



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

조경학석사 학위논문

유형별 도시 녹지 도입에 따른
혹서기 저층 고밀 시가화지역의
열 쾌적성 변화량 추정

Simulated Thermal Comfort during the
Hottest Season in Low-rise Dense Urbanized
Area by Applying Urban Greening Units

2020년 8월

서울대학교 환경대학원

환경조경학과

김 중 희

유형별 도시 녹지 도입에 따른 혹서기 저층 고밀 시가화지역의 열 쾌적성 변화량 추정

지도교수 송 영 근

이 논문을 조경학석사 학위논문으로 제출함
2020년 4월

서울대학교 환경대학원
환경조경학과
김 종 희

김종희의 석사 학위논문을 인준함
2020년 6월

위 원 장

孫 鎭 勲



부위원장

정 수 중



위 원

송 영 근



유형별 도시 녹지 도입에 따른 혹서기 저층 고밀 시가화지역의 열 쾌적성 변화량 추정

서울대학교 환경대학원 환경조경학과
김 중 희

위 논문은 서울대학교 및 환경대학원 환경조경학과 학위논문
관련 규정에 의거하여 심사위원의 지도과정을 충실히
이수하였음을 확인합니다.

2020년 8월

위 원 장 孫 鎬 勲 (서울대학교 환경대학원 교수)
부위원장 정 수 종 (서울대학교 환경대학원 교수)
위 원 송 명 근 (서울대학교 환경대학원 교수)

국문초록

도시인구의 증가로 도시 면적이 확대됨에 따라 도시 열환경 개선에 대한 중요성은 지속적으로 제기되고 있다. 주변 지역보다 기온이 높게 나타나는 현상인 도시 열섬은 저층 고밀 시가화지역에서 가장 뚜렷이 나타나는 것으로 보고된다. 도시의 열 발생은 자연 열원인 태양과 인공열로부터 기인하는데, 도시의 인공 피복과 높은 건폐율은 열의 축적을 더욱 촉진하기 때문에 온도변화에 직접적인 영향을 미치는 현열을 저감시킴으로써 도시 열을 낮출 수 있다. 도시 녹지는 단과 복사를 차단하고 잠열을 생성하여 도시 열저감에 대한 대응책이 될 수 있으며, 전략적인 도시 녹지의 조성으로 도시 열 환경을 개선할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 저층 고밀 시가화지역에서의 열 쾌적성 개선에 대한 녹지 유형과 녹지 유형의 적용 비중에 따른 기여도를 정량화하였다. 이를 위하여 연구에서는 첫째, 저층 고밀 시가화지역에 도입 가능한 녹지 유형을 분류하고, 녹지 유형 적용에 따른 대상지의 열 쾌적성을 분석한다. 둘째, 녹지 도입으로 인한 열 쾌적성의 주간 변화를 분석하여 강한 열에 노출되는 시간 변화량을 분석한다. 셋째, 녹지 도입에 따른 열 쾌적성의 공간분포를 분석하여 강한 열을 받는 공간적 분포 비율이 감소하는지 분석한다.

연구 대상지는 서울시 강남구 역삼동 일대 저층 고밀 시가화지역으로, 연중 가장 더운 혹서기에 대한 녹지의 열 저감 기능을 평가하였다. 대상지에 적용되는 녹지 유형은 도시 경관에 통합되는 모든 녹지로, 도로변 가로, 건물변 가로, 오픈스페이스, 벽면, 옥상의 총 다섯 가지 유형으로 분류되었다. 이때 녹지 적용양에 차이를 두어 소극적 녹화(시나리오 A), 현실적 녹화(시나리오 B), 적극적

녹화(시나리오 C) 상태를 상정하였다. 본 연구에서는 ENVI-met 프로그램을 통해 미기후를 시뮬레이션하고, rBiometeo 패키지를 통해 UTCI를 산출하였다.

결과적으로 가장 효과적인 녹지 유형은 오픈스페이스로 최대치의 녹지가 적용된 경우 평가 범위의 주간 평균 UTCI는 1.9℃만큼 저감되었다. 차례로 도로변 가로가 UTCI 1.7℃, 벽면이 UTCI 1.3℃, 건물변 가로가 UTCI 0.2℃, 옥상이 UTCI 0.1℃ 만큼 저감되었으며, 모든 녹화를 적용한 경우 3.1℃만큼 저감이 되었다. 주간 중 녹지의 열 쾌적성 증진 효과가 가장 뛰어났던 시간은 16시로, 가장 효과적이었던 오픈스페이스 유형의 적용으로 평가 범위의 UTCI가 3.3℃만큼 저감되었으며, 모든 녹화를 적용한 경우 UTCI 4.9℃ 만큼 저감되어 UTCI 척도를 한 단계 낮출 수 있는 수준으로 열 쾌적성이 증진됨을 확인하였다. 한편, 녹지 적용으로 인하여 UTCI 척도 중에서는 열 쾌적성이 가장 나빴던 Very strong heat stress 구간의 분포 비율이 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 연중 가장 더운 시기인 혹서기 주간이라는 시간적 범위에서 진행된 연구로 연구 대상지에서 효율적인 녹지 유형을 제안하며, 각 유형에 대한 열 쾌적성 저감량에 대한 정량적인 수치를 제공한다. 연구의 결과는 도시계획 및 녹화계획, 지역 주민과 지자체의 녹화 의사 결정 시 도움을 줄 수 있다.

주요어 : 도시 열섬, 열 쾌적성, 미기후, UNIVERSAL THERMAL CLIMATE INDEX (UTCI), 도시 구조, ENVI-met

학 번 : 2017-21227

목 차

제1장 서론

1절 연구의 배경 및 목적	01
1. 연구 배경	01
2. 연구 목적	02
2절 연구의 범위	04
1. 공간적 범위	04
2. 시간적 범위	05
3절 연구 과정 및 내용	06

제2장 이론적 고찰

1절 도시 열 발생의 원인 및 대책	07
1. 도시의 열 발생 원인	07
2. 서울시 열환경 분석 사례	08
3. 열환경 개선 대책	10
2절 미기후 및 열 쾌적성의 평가	11
1. 도시의 기후와 공간 스케일	11
2. 도시 미기후와 열 쾌적성	12
3. 수치 모델을 활용한 시뮬레이션 평가	15
3절 선행연구 고찰	21

제3장 연구 방법

1절 연구 방법	26
1. 대상지 분석	26
2. 식재 시나리오	28
2절 프로그램 구동	29
1. 미기후 산출	29
2. UTCI 산출	31
3. 입력자료 구축	32

제4장 결과 및 고찰

1절 시나리오별 평가 범위	41
2절 시나리오별 주간 UTCI 평가	43
1. 시나리오별 주간 UTCI 평가	43
2. 주간 시간대별 UTCI 감소량 분석	54
3. 시나리오별 효과 평가	57
3절 시나리오별 UTCI 공간분포 평가	61
1. 시나리오별 UTCI 척도의 공간분포 비율	61
2. 시나리오별 UTCI 공간분포	66
4절 고찰	64
1. 녹지의 양과 UTCI와의 관계	64
2. 소결 및 고찰	66

제5장 결론

1절 결론	68
2절 연구의 의의 및 한계	68

표 차 례

표 1 열 스트레스 측면에서 분류된 Universal Thermal Climate Index (UTCI) 등가온도	15
표 2 ENVI-met을 활용한 도시 열환경 평가 관련 선행연구	21
표 3 대상지 정보	26
표 4 Local climate zone compact low-rise 유형에 대한 기하학적 및 표면 피복 특성의 값	27
표 5 식재 시나리오	28
표 6 피복 재료별 알베도 및 방사율 설정값	32
표 7 수목 캐노피 구현	35
표 8 2018년 8월 1일 강남구의 시간별 기온 및 상대습도	39
표 9 강남구 기상입력자료	40
표 10 시나리오별 평가 범위	42
표 11 시나리오별 주간 동안의 시간별 평균 UTCI 및 표준편차	44
표 12 녹지적용 0% 대비 시간별 UTCI 감소량	49
표 13 시나리오별 주간 평균 UTCI 및 16시 UTCI 감소량	51
표 14 시나리오 A 대비 시간별 Very strong heat stress 구간의 감소율	57
표 15 시나리오 A 대비 대비 시간별 Strong heat stress 구간의 감소율	57
표 16 시나리오 A 대비 대비 시간별 Moderate heat stress 구간의 감소율 ..	58
표 17 시나리오별 UTCI 및 UTCI 관련 인자 정보	64
표 18 UTCI와 시나리오 인자 간 스페어만 순위상관분석	65
표 19 2017년 7월 29일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	80
표 20 2017년 7월 30일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	81
표 21 2017년 8월 12일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	82
표 22 2018년 7월 21일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	83
표 23 2018년 7월 27일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	84
표 24 2018년 8월 10일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	85
표 25 2019년 8월 2일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	86
표 26 2019년 8월 19일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	87
표 27 2019년 8월 20일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도	88

표 28 시나리오별 기온 데이터	89
표 29 시나리오별 평균복사온도 데이터	90
표 30 시나리오별 풍속 데이터	91
표 31 시나리오별 습도 데이터	92

그 립 차 례

그림 1 서울시 열지수, 기온, 습도 그래프(2011년 1월 1일 ~ 2020년 2월 29일)	4
그림 2 공간적 범위 - 서울시 강남구 역삼동 저층 고밀 시가화지역 일대	5
그림 3 연구 흐름도	6
그림 4 서울시 열환경 분석 선행연구	9
그림 5 도시 지역에서 발견되는 기후 규모와 수직 층의 도식. PBL - planetary boundary layer, UBL - urban boundary layer, UCL - urban canopy Layer	12
그림 6 식물 평가 모델의 프레임 워크	16
그림 7 서울시 불투수 비율이 높은 저층 시가화지역의 열환경 표준편차(초록색:좋음~붉은색:나쁨)	27
그림 8 ENVI-met 구동 과정	29
그림 9 대상지의 ENVI-met 구현 모습 - 3D 뷰, 건물 및 식재, 토지 피복 ..	33
그림 10 역삼동 일대의 ENVI-met 구현 모습(녹지적용 비율 100%) - 3D 뷰, 건물 및 식재, 토지 피복	36
그림 11 역삼동 일대의 ENVI-met 구현 모습(녹지적용 비율 100%) - 3D 뷰, 건물 및 식재, 토지 피복	37
그림 12 도로변 가로 유형의 주간 UTCI	46
그림 13 건물변 가로 유형의 주간 UTCI	46
그림 14 오픈스페이스 유형의 주간 UTCI	47
그림 15 벽면 유형의 주간 UTCI	47
그림 16 옥상 유형의 주간 UTCI	48
그림 17 모든 녹지 유형 적용 시 주간 UTCI	48
그림 18 시나리오별 주간(6시~19시) 평균 UTCI 비교	52
그림 19 시나리오별 주간(6시~19시) 평균 UTCI 감소량 비교	52
그림 20 시나리오별 16시 UTCI 비교	53
그림 21 시나리오별 16시의 UTCI 감소량 비교	53
그림 22 시간별 UTCI 평가 척도의 공간 분포 비율	55
그림 23 시나리오별 UTCI의 공간 분포(16:00, 지상 1.4m)	61
그림 24 시나리오별 UTCI 분포 비교(16:00, 지상 1.4m)	63

제1장 서론

1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구 배경

전 세계적인 도시인구가 증가하면서 도시 면적이 확대됨에 따라 도시 열환경 개선에 대한 중요성은 지속적으로 제기되고 있다. 도시지역이 교외지역에 비하여 기온이 높게 나타나는 도시 열섬(urban heat island, UHI)은 이미 잘 알려진 현상으로, 특히 인공 피복률이 높을수록, 열용량이 클수록, 인동간격이 좁고 통풍이 불량할수록 집단화된 도시 열섬을 유발한다(Sukkop et al., 1993). Stewart & Oke (2012)의 local climate zone (LCZ) 분류에 의하면 열섬 현상은 건물 밀도가 높은 고밀 지역에서 가장 뚜렷하게 나타난다. 고밀 시가화지역은 높은 건폐율, 콘크리트와 아스팔트 위주의 토지 피복, 각종 인공열로 인해 지속적으로 열에너지의 축적이 일어나(Owe et al., 1998), 기타 지역에 비하여 열스트레스에 취약한 것으로 평가되고 있다. 도시 열섬은 시민의 생활 환경에도 직접적으로 영향을 미친다. 특히 폭서기와 같이 연중 기온이 높은 시기에는 온열병 발병부터 사망에 이르기까지 건강적인 피해를 야기할 수 있기에 높은 열환경에 노출되는 시공간적 범위를 축소할 필요가 있다.

도시의 열은 자연 열원인 태양으로부터 입사되는 단파 복사열과 인간 활동으로 방출되는 인공열에 의해 발생한다. 알베도가 낮은 도시의 인공 피복은 열의 흡수량을 높이고, 높은 건물 밀도는 장파 복사로 반사되는 복사열의 이탈을 방해하여 도시에서는 열이 지속적으로 축적되는 현상이 발생한다. 도시의 열 저감은 온도변화에 직접적인 영향을 미치는 현열의 저감을 통해 이루어질 수 있다. 현열을 낮추기 위해서는 단파 복사를 차단하여 순 복사열을 저감시키거나 잠열을 증가시켜야 하는데, 도시의 수목은 높은 수고로 단파 복사를 차단하고 증발산 작용으로 잠열을 증가시켜(Wang et al., 2016) 도시의 현열을

저감할 수 있다(박채연 외, 2017). 즉 도시 녹지를 전략적으로 조성함으로써 도시 열환경을 개선할 수 있다.

실제로 가로수 등 지면부 녹화, 벽면녹화, 옥상녹화 등의 활용은 실제 열환경 개선에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 그러나, 다수 기존 연구에서는 시가화지역 대상의 연구에서 단일 혹은 일부 녹지 유형만을 고려하여 평가하고 있으며(권기욱 외, 2013; 정희은 외, 2015; Morakinyo & Lam, 2016; Morakinyo et al., 2017; 허희영 외, 2017; 권유진 외, 2019; Zang et al., 2019; Nadia Assaf, 2020), 대상지 전체의 녹지 유형을 고려한 연구는 진행되지 않았다. 대상지 특성에 따라서 효과적인 녹화 유형과 정량적 개선 수치에는 차이가 발생하므로(Middel et al., 2014), 식재가 가능한 전체 범위를 고려하는 것은 중요하다. 한편, 최근 연구에서는 열환경 평가 지표로 기온, 습도, 평균복사온도, 풍속 및 사람의 신체 대사 조건이 반영된 지표인 열 쾌적성과 관련된 연구가 진행하고 있다(Morakinyo&Lam, 2016; Cheung et al., 2018; Ren Yiwel, 2018; Li et al., 2019; Amir Aboelata, 2020). 그러나, 아직까지 국내 연구에서는 다수의 연구에서 열환경을 기온만으로 평가하고 있으며(권유진 외, 2019; Nadia Assaf, 2020), 열 쾌적성을 분석한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 대상지에 적용할 수 있는 전체 녹지 유형을 파악하고 분류한 뒤 녹지 유형별로 시공간적 정량 개선치를 도출하고자 한다. 열환경을 평가하는 지표로는 물리적 수치에 해당하는 기온과 평균복사온도, 체감 수치에 해당하는 열 쾌적성을 채택하여 양방향 평가하고자 한다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 열환경에 취약한 저층 고밀 시가화지역에 서로 다른 녹지 유형 도입에 따른 열 쾌적성의 변화를 정량적으로 파악하는 것이다. 이는 녹화의 유형에 따라 혹한의 환경에 노출되는 범위가 어떻게 변화하는지 알아보기 위함이다. 따라서 연구에서는 첫째, 저층 고밀 시가화지역에 도입 가능한

녹지 유형을 분류하고, 녹지 유형 적용에 따른 대상지의 열 쾌적성을 분석한다. 둘째, 녹지 도입으로 인한 열 쾌적성의 주간 변화를 분석하여 강한 열에 노출되는 시간 변화량을 분석한다. 셋째, 녹지 도입에 따른 열 쾌적성의 공간 분포를 분석하여 강한 열을 받는 공간적 분포 비율이 감소하는지 분석한다.

2절 연구의 범위

1. 시간적 범위

시간적 범위는 연중 열환경에 가장 취약하여 우선적으로 관심을 기울여야 하는 혹서기로 선정한다. 또한, 분석 수치가 단일 시간대의 일시적인 기록이거나 야간 등과 같이 야외활동이 적은 시기의 기록이기보다, 실제 야외활동 시기에 노출이 누적되는 악영향을 고려하여 주간 시간대의 시간적 적산값을 평가하고자 한다. 본 연구에서는 최근 3년 동안의 평균적인 혹서기를 선정하여 분석을 진행하였다(그림 1).

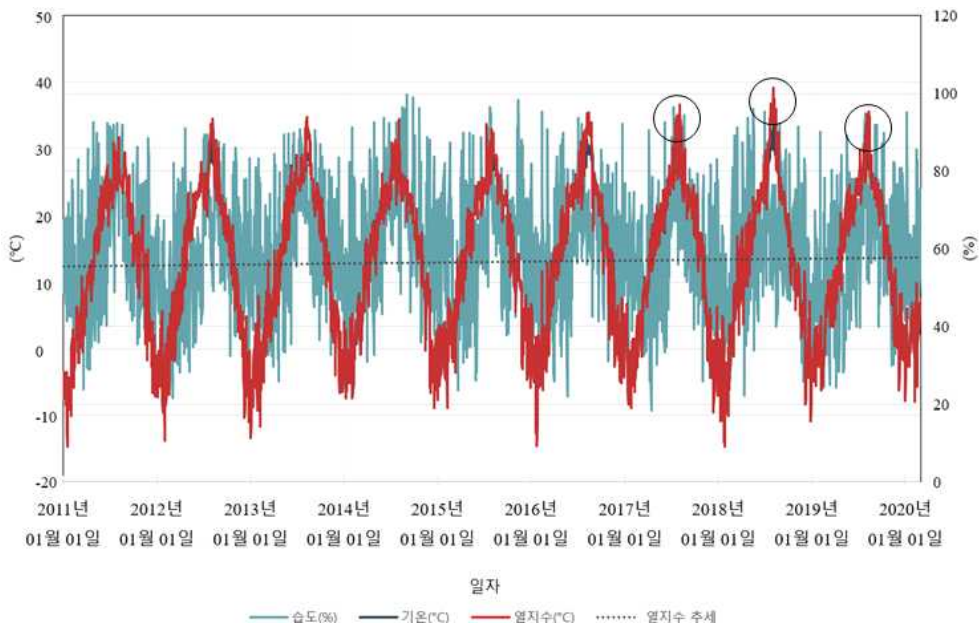


그림 1 서울시 열지수, 기온, 습도 그래프(2011년 1월 1일 ~ 2020년 2월 29일)

자료: 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)

2. 공간적 범위

연구의 공간적 범위는 저층 고밀 시가화지역에 해당하는 서울시 강남구 역삼 2동 일대(37.497290 ° N, 127.041935 ° E) 200 m × 200 m 로 선정하였다(그림 2). 서울시 인구밀도는 2015년 기준 16,364명/㎢로, 대한민국 평균 인구밀도 509.2명/㎢에 비해 매우 높은 수치를 보인다(KOSIS, 2015). 서울 인구는 1960년대 이후 폭발적으로 증가하였으며 증가한 인구의 수용을 위하여 저층 주거지역을 고밀도로 대거 개발하였다. 당시 건축 관련 법 및 도시계획이 미비한 상태에서 개발이 이루어졌기에(김민혜 외, 2007) 서울의 저층 고밀 시가화지역은 환경과 쾌적성 면에서 여러 문제를 야기한다. 연구 대상지인 역삼 2동 일대 저층 고밀 시가화지역의 경우 모든 필지에 건물이 존재하여 공원과 같은 일정 규모를 지닌 녹지의 도입이 어렵다(최희준 외, 2017). 실제로 강남구의 공원율은 16.7%로 서울시 평균 공원율보다 11.1%가량 낮다(통계청, 2018). 이에 서울시 중점녹화지구로도 지정된 바 있으며 지역민과 지자체는 녹지 부족 문제를 해결하고자 가로, 건물 벽면, 옥상 등 유휴 공간에 녹지를 조성하고 있다. 본 연구에서는 대상지 범위에서 녹지로 인한 영향을 열 쾌적성 측면에서 정량 평가하고자 하였다.

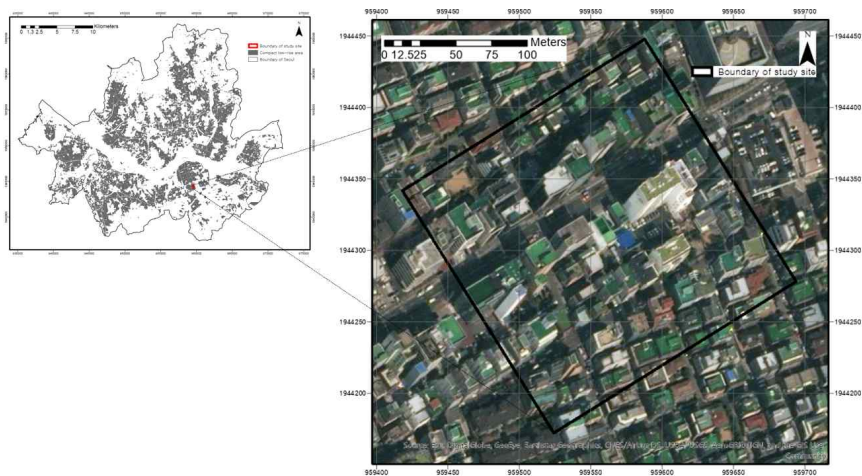


그림 2 공간적 범위 - 서울시 강남구 역삼동 저층 고밀 시가화지역 일대
위성영상 자료: Esri, Digital Globe, GeoEye, Aero GRID, IGN

3절 연구 과정 및 내용

연구의 과정은 크게 이론적 고찰을 통한 평가 방법 설정, 시뮬레이션 구동을 위한 데이터 구축 및 프로그램 구동, 시뮬레이션 모델의 검증, 결과 도출 및 고찰의 네 단계로 진행된다(그림 3). 이론적 고찰 단계에서 녹지의 열 저장 기능을 이해하고 수목의 어떤 특성 차이가 열환경에 영향을 미치는지 파악한다. 또한 이론적 고찰을 통해 분석하고자 하는 공간의 스케일, 열환경 평가 지표, 시뮬레이션 모델을 선정한다. 데이터 구축 및 분석 단계에서는 시뮬레이션 구동을 위한 데이터를 수집하고, 프로그램을 구동한다. 수치지형도 등의 데이터를 통해 대상지의 물리적 구조를 구현하며, 수고, 수형, 엽면적밀도(leaf area density, LAD) 등을 반영한 수목을 구현하고, 분석하고자 하는 기상자료를 취득 및 입력하여 해당 시기의 기후 분석이 가능하도록 한다. 최종적으로, 시뮬레이션을 통해 미기후 및 UTCI 값을 산출하여 결과를 도출하고, 연구 결과에 대한 고찰을 진행한다.



그림 3 연구 흐름도

제2장 이론적 고찰

제1절 도시 열 발생의 원인 및 대책

1. 도시의 열 발생 원인

도시의 열 발생 원인은 태양으로부터 받는 자연열과 인간 및 인간 활동으로 인해 방출되는 인공열로 구분할 수 있다. 자연 열원인 태양이 발산하는 단파 복사(shortwave radiation)가 도시 표면에 입사하면 표면과 대기는 입사하는 단파 복사열을 흡수하여 자체적인 열과 온도를 지니게 된다(박채연 외, 2017). 이렇게 온도를 갖게 된 모든 표면은 장파 복사(longwave radiation)를 발산하며 (Grimmond, 1992), 단파 복사 및 장파 복사가 표면에 닿을 때 흡수, 투과, 반사의 과정이 반복하여 일어난다. 도시의 경우 건물의 수직 벽면으로 인해 다중 반사가 일어나는데, 특히 건물 밀도가 높을수록 반사와 흡수가 끊임없이 일어나 복사열이 미처 빠져나가지 못하고 포획되는 트랩핑(trapping) 현상이 일어난다(Oke, 1982). 즉 건물 밀도가 높을수록 더 많은 태양복사의 흡수가 일어나며, 도시의 주 피복 재료인 인공 피복은 더 많은 복사열을 흡수하게 된다. 더불어 운송, 교통, 산업 처리, 난방, 냉각 등으로 발생하는 인공열은 현열¹⁾을 증가시킨다. 도시의 열 발생은 토지 피복의 인위적 변화 및 인간 활동에 의한 미기후 변화가 열환경에 투영된 결과이다. 즉, 피복변환과 인공열을 발생시키는 도시화가 원인이 되어 주변 지역보다 도시의 내부 온도가 높게 나타나는 도시 열섬이 발생하게 된다(Sukkop et al., 1993).

1) 현열(sensible heat): 물질을 가열 혹은 냉각했을 때 상태변화 없이 온도변화에만 사용되는 열량을 말한다. 반대로, 온도변화에 영향을 미치지 않고, 열을 방출하거나 흡수하여 상태변화에 영향을 미치는 열을 잠열(latent heat)이라고 한다(위키백과, 2020).

2. 서울시 열환경 분석 사례

거시규모 분석에 해당하는 서울시 열환경 분석 사례에서는 다수의 연구에서는 위성영상을 활용한 지표면 온도와 AWS 자료를 이용하였다.

국토연구원(2016)은 Landsat 8 영상을 기반으로 서울 및 일대 수도권 접지기층의 야간 열섬을 분석하였다. 분석 결과, 서울시에서는 저층 구시가지에서, 수도권 일대에서는 산업단지와 공항에서 집단적인 도시 열섬이 형성되고 있음을 분석하였다(그림 4-(가)).

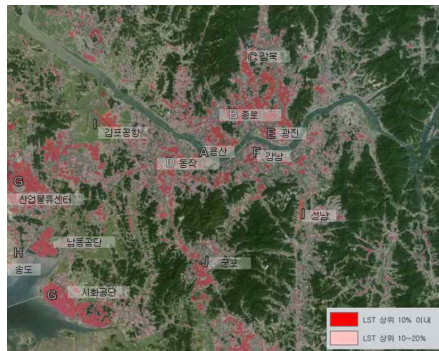
서울연구원(2016)은 서울시를 대상으로 서울시 비오흘지도와 선행연구를 토대로 기후옘지도를 제작하였으며, 기후옘지도 중 열환경 개선 우선 지역을 도출하였다. 기후옘지도 제작에서는 비오흘지도 범례를 베이스로 하여 선행연구를 토대로 기후옘을 총 12가지 유형으로 분류하고 이를 지도화 하였다. 기후옘 유형 중 고밀 도시지역, 중밀 도시지역, 공업지역을 열환경 개선 우선 지역으로 선정하였다(그림 4-(나)).

국립재난안전연구원(2017)은 위성영상을 활용하여 한반도 지표면 온도 분석의 기술 개발 연구를 진행하였다. 지표면 온도 추출을 위하여 Landsat 8 영상을 활용하였으며, 서울시의 열환경은 ArcGIS에서 커널밀도를 이용하여 100m 단위로 분석을 진행하고 분석 지도를 도출하였다. 결과로는 시가화 면적 비율이 높을수록 온도가 높게 나타나는 경향을 알 수 있었으며, 특히 동대문구에 열 집중 현상이 뚜렷하게 나타남을 확인하였다(그림 4-(다))

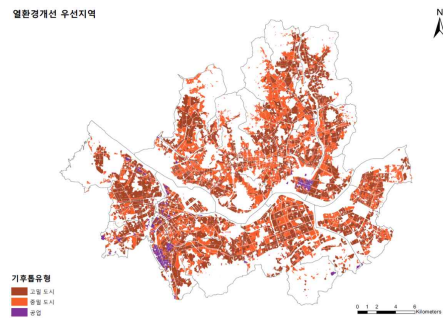
안새결 외(2017)는 서울시 주거지역 건폐율 및 건물 특성에 따른 여름철 주간 지표면 온도(land surface temperature, LST)를 분석하였다. 분석에는 Landsat 8 영상을 활용하여 2014-2016년 동안의 다중시기 지표면 온도 평균치를 도출하였으며, 지표면 온도 결과와 건폐율과 통계분석을 통해 두 지표 간 상관관계를 분석하였다. 결과적으로, 열섬 대책의 우선순위는 저층 주거유형 - 중층 주거유형 - 고층 주거유형(16-30층) - 초고층 주거유형(31층 이상) 순으로 나타나, 저층 건축물 일대의 열환경이 가장 열악함을 시사하였다(그림 4-

(라)).

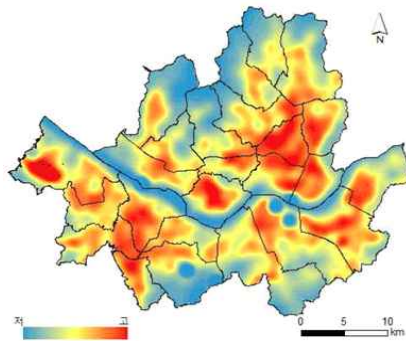
결론적으로, 집단적인 도시 열섬이 발생하고, 지표면 온도가 높게 나타나는 등 열환경이 높게 분석되는 지역은 저층 건물로 구성된 건물 밀도가 높은 지역임을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 서울시 중 열환경이 취약한 저층 고밀 시가화지역에 초점을 맞추어 연구를 진행하고자 한다.



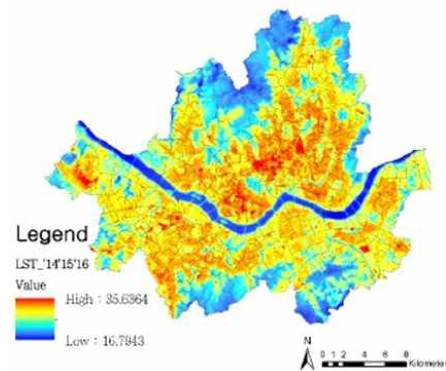
(가) 서울시 및 주변 수도권 일대의 접지기층 야간 열섬 분포(LST 분포 상위 10%를 접지기층 야간 열섬 발생지역으로, LST 분포 상위 20% 지역을 접지기층 야간 열섬 발생지역 우려 지역으로 간주)
자료: 국토연구원(2016)



(나) 서울시 열환경 개선 우선 지역
자료: 서울연구원(2016)



(다) 열환경밀집도
자료: 국립재난안전연구원(2017)



(라) 서울 지표면 온도 산출 결과(2014~2016)
자료: 안새결 외(2017)

그림 4 서울시 열환경 분석 선행연구

3. 열환경 개선 대책

열 평형식(heat balance equation)(수식 1)에 의하면 도시의 열을 저감할 수 있는 대안을 찾을 수 있다. 열 평형식에 의하면 열 저감을 위해서는 온도변화에 직접적인 영향을 주는 현열을 낮추어야 한다(박채연 외, 2017). 열 평형식에 의하면 현열을 낮추기 위해서는 순복사열과 인공열을 낮추거나 잠열²⁾과 저장열을 높이는 방안을 고안해야 하는데, 조정계획 및 도시계획 측면에서는 식생을 통하여 현열을 낮출 수 있다.

$$Q_H = (Q^* + Q_F) - (Q_L + \Delta Q_S) \quad \text{수식 1}$$

Q_H = 현열(Sensible heat)

Q^* = 순복사열(Net radiant)

Q_F = 인공열(Anthropogenic heat)

Q_L = 잠열(Latent heat)

ΔQ_S = 저장열

■ 식생의 열 저감 기능

식생은 순 복사열을 저감하고, 잠열을 증가시키는 기능을 하여 결론적으로 현열을 낮출 수 있다. 순 복사열의 저감은 식생의 알베도(albedo)³⁾와 그림자 효과(shade effect)를 통해 이루어진다. 식생의 알베도는 도시의 주 피복인 아스팔트, 콘크리트의 알베도에 비해 높은 값을 갖는다. 따라서 도시로 투과되는 복사열을 도시의 인공 피복에 비하여 높은 비율로 반사할 수 있다. 또한 식생

2) 잠열(latent heat): 열을 방출하거나 흡수하여 상태변화에 영향을 미치는 열로, 온도변화에는 영향을 미치지 않는다(위키백과, 2020).

3) 알베도(albedo): 반사율을 나타내며 0에서 1 사이의 값을 가진다. 0은 입사한 복사조도의 완벽한 흡수를 의미하며, 1은 입사한 복사 조도의 완벽한 반사를 의미한다(기상학백과, 2020). 즉 반사율이 낮을수록 더 많은 빛을 흡수한다.

에 도달한 복사열은 일정량이 반사되고, 식생에 흡수된 뒤 나머지 복사열이 식생의 아래로 투과하여 식생이 없는 곳에 비해 적은 양의 복사열을 받게 된다. 이것을 그림자 효과라고 한다. 그림자 효과는 투과성 및 생성하는 그림자 면적에 따라 복사열을 차단하게 된다(Shashua-bar et al. 2006; Kong et al. 2016). 또한 식생은 잠열을 증가시켜 현열을 저감시키는데, 그 요인은 증발산(evapotranspiration) 작용이다. 식생과 주변 토양에서는 수분이 수증기로 전환하는 상태변화가 일어나 증발열이 발생한다. 또한, 식생에서는 기공을 통해 수분이 수증기로 나가는 증산작용이 일어난다. 이처럼 식생과 식생 주변의 토양에서는 수분에서 수증기로의 상태변화를 통해 상태변화에 필요한 잠열을 생성하게 되고, 현열은 낮아지게 된다.

제2절 미기후 및 열 쾌적성의 평가

1. 도시의 기후와 공간 스케일

도시의 기후는 다양한 공간 스케일에서 분석될 수 있으며 공간 스케일에 따라 평가 결과가 다르게 나타나므로(국토연구원, 2016), 연구의 목적과 공간 규모를 고려한 평가 스케일의 선정은 중요하다. Oke (1987)에 의하면 도시 기후 스케일은 macro, meso, local, micro 네 가지로 분류된다(그림 5). macroscale은 수 천 킬로미터 규모로 전 지구적 범위 평가에 적절하며, mesoscale은 수 십 킬로미터 규모에 해당하여 국가 혹은 도시 규모 평가에 적합하다. localscale은 1 킬로미터에서 수 십 킬로미터 규모로 지역 규모 평가에 적합하며, 경관 특징과 도시 개발 단계 식별에 주로 활용된다. microscale은 1 미터에서 수 백 미터 규모로, 대기와 지표면의 상호작용을 분석하는데 용이하다. UHI와 UCI 분석을 위한 대부분의 연구에서는 microscale과 localscale을 채택해왔다(Guan 2011). 본 연구는 보행 환경을 평가하기 위한 연구이므로 microscale에서 분석을 진행하도록 한다.

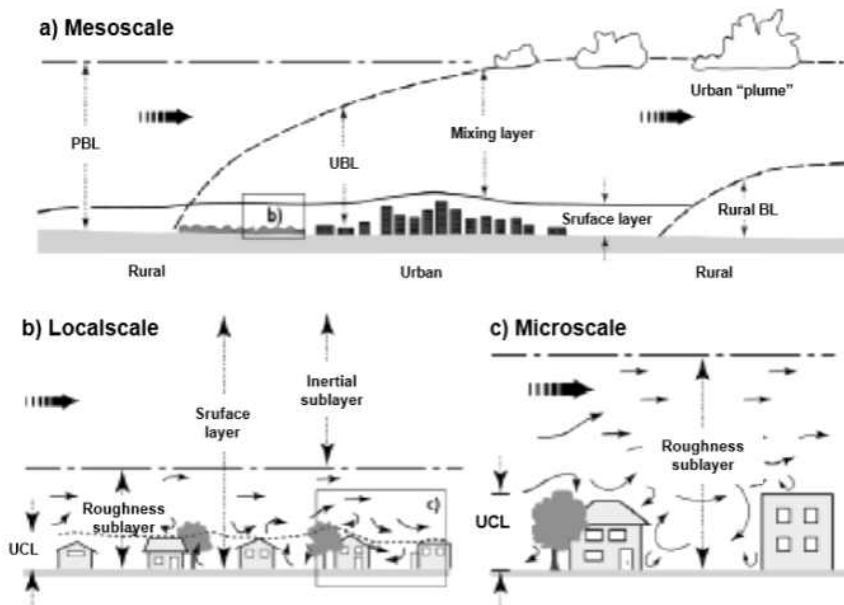


그림 5 도시 지역에서 발견되는 기후 규모와 수직 층의 도식. PBL - planetary boundary layer, UBL - urban boundary layer, UCL - urban canopy Layer

자료: Oke (2004)

2. 도시 미기후와 열 쾌적성

우리나라는 폭염기에 해당하는 극한의 시기에 폭염 특보⁴⁾를 발령하는데, 이 때 폭염 경보와 주의보를 구분하는 기준을 기온으로 삼고 있다. 그러나 극한의 무더위에서 실제 사람에게 영향을 미치는 요인은 기온 외에도 평균복사온도, 습도, 풍속과 같은 미기후 조건이 상당한 비중을 차지한다. 즉, 열환경 평가에 있어 단일 변수의 고려는 한계가 있으며, 다양한 변수가 종합적으로 고려될 필요가 있다. 단일 기후 파라미터는 사람이 느끼는 열 감각의 변화를 50%밖에 설명하지 못하므로(Lau et al., 2019), 네 가지 미기후 요소와 신체조건이 동시 평가되는 열 쾌적성에 관심을 가질 필요가 있다.

4) 폭염 특보: 여름철 매우 심한 더위가 계속될 때 특별히 알리는 보도. 폭염 주의보와 폭염 경보로 나뉜다(네이버 사전, 2020).

■ 미기후

미기후란 지표면 높이 약 1.5m 이하에 해당하는 접지기층에서 수직적 또는 수평적으로 나타나는 기후를 말하며, 미기후에 해당하는 기상요소는 지면의 특성에 민감하게 반응한다(Geiger, 1927). 미기후(microclimate)라는 용어는 Geiger(1927)가 집필한 책에서 처음 사용되었으며, 1990년대에 처음으로 도시 형태와 기후의 관계를 조사하는 프로젝트가 시행되었다(Toparlak et al., 2017). 2000년대부터는 도시 미기후 모델과 미기후 관측을 위한 새로운 기술들이 개발되기 시작했다(Mills, 2014). 도시의 미기후는 특히 인공 피복 및 구조물로 인해 해당 지역에서 주변 환경과 끊임없이 복잡한 상호작용을 하며, 온도, 습도 등의 미기후 요소를 통해 주변 환경에 지속적으로 영향을 미친다(국토연구원, 2016). 이에 적절한 계획을 통하여 미기후에 변이를 줌으로써 도시지역에 나타나는 환경 문제에 대한 대응책을 제시할 수 있다.

■ 열 쾌적성

열 쾌적성의 정의는 “열환경에 대한 만족도를 표현하고 주관적인 평가에 의해 결정되는 마음의 상태” 이다(ASHRAE Standard, 2004). 즉, 열 쾌적성은 환경적 요인과 개인적 요인에 의해 결정된다고 말할 수 있다. 열 쾌적성에 직접적으로 영향을 미치는 6가지 주요 요인이 있는데, 환경적 요인으로는 기온, 평균복사온도, 풍속, 습도가, 개인적 요인으로는 대사율과 의복 수준이 영향을 미친다. 개인의 기대와 같은 심리적 요인도 열 쾌적성에 영향을 줄 수 있다.

열 쾌적성을 평가하는 지표에는 ET (Effective Temperature; Gagge et al., 1971), SET (Standard Effective Temperature; Gonzalez et al., 1974; Gagge et al., 1986), PMV(Predicted Mean Vote; Fanger, 1972), COMFA (COMfort Formula; Brown et al., 1986, 1995), PT (Perceived Temperature; Jendritzky et al., 1990; Staiger et al., 1997; Staiger et al., 2012), PET(Physiological

Equivalent Temperature; Höppe, 1993; Höppe, 1999; Mazarakis et al., 1999), MENEX (Man-Environment heat Exchange; Blazejczyk, 1994, 2004) 등의 여러 가지 모델이 존재하지만, 이들은 야외에서의 신체 매커니즘에 대한 반영이 불충분하다는 평가를 받아왔다(Yiwei, 2018).

반면, Universal Thermal Climate Index (UTCI)는 인간 신체 모델(Fiala et al., 2001; Fiala et al., 2012)과 의류 효과(Havenith et al., 2012)와 관련된 최신 매커니즘을 반영하여, 인간의 열 감각과 쾌적성 분석에 있어 최첨단 지표라고 평가되고 있어(Jendritzky et al., 2012; Bröde et al., 2012; Park et al., 2014), 본 연구에서는 UTCI를 열 쾌적성의 지표로 선정한다. UTCI는 2011년 ISB (International Society of Biometeorology; <http://www.biometeorology.org>)에서 발표된 실외 열 쾌적성 지표로, COST(European Cooperation in Science and Technology) Action 730에 의해 새롭게 개발되었다(Jendritzky et al., 2012).

열 쾌적성은 어떠한 기후 조건에서 인간의 체감이 변화되는 단계로 척도가 분류되는데, UTCI의 평가 척도는 표 1과 같다. 척도의 분류 기준은 heat stress (더위) 의 경우 평균 땀 속도, 시간당 직장온 증가 속도, 시간당 피부 온도 증가 속도, 순열손실량, 피부 습도 증감량 등이 요소가 되며, cold stress (추위) 에서는 평균 피부 온도, 얼굴 피부 온도, 손 피부 온도, 떨림 발생, 시간당 직장온 감소 속도, 피부 혈류 속도의 감소 등이 요소가 된다.

표 1 열 스트레스 측면에서 분류된 Universal Thermal Climate Index (UTCI) 등가온도

UTCI(°C) range	Stress category
above +46	Extreme heat stress
+38 to +46	Very strong heat stress
+32 to +38	Strong heat stress
+26 to +32	Moderate heat stress
+9 to +26	No thermal stress
+9 to 0	Slight cold stress
0 to -13	Moderate cold stress
-27 to -40	Very strong cold stress
below -40	Extreme cold stress

자료: Blazejczyk et al.(2013)

3. 수치 모델을 활용한 시뮬레이션 평가

도시 공간의 미기후 및 열쾌적성은 시뮬레이션 혹은 실측으로 평가가 가능하다. 하지만 실측의 경우, 도시의 복잡한 구성요소에 따른 미기후 변동을 추정하는 데 있어 많은 시간과 비용을 필요로 한다(Hamada et al., 2010). 반면, 시뮬레이션 모델을 이용하게 되면 분석하고자 하는 공간 및 계획안의 구현을 통하여 연구자가 원하는 조건의 상황 분석이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 다양한 식재 계획안을 적용해보는 것을 목표로 하기에 시뮬레이션 모델을 이용하여 미기후 및 열 쾌적성 값을 산정하기로 한다.

■ 시뮬레이션 모델의 구동 원리

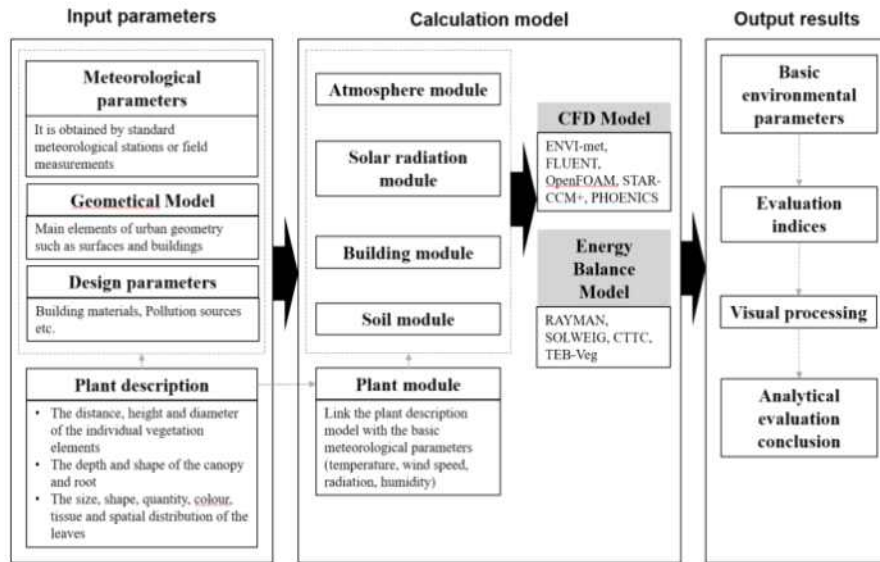


그림 6 식물 평가 모델의 프레임 워크

자료: Yang et al.(2019) 저자 재구성

도시환경에서 식생과 관련된 작용을 평가할 수 있는 수치 모델은 몇 가지 존재하는데 이들의 기본 프레임워크는 그림 6과 같이 입력 파라미터 - 계산 모델 - 아웃풋의 세 단계로 분류된다(Yang et al., 2019). 프로그램 구동 시 요구되는 인풋 데이터는 기상 파라미터, 기하학 모델, 디자인 파라미터, 식생 정보이다. 기상 파라미터는 온도, 습도, 풍속, 풍향 등의 관측치로, 이들이 환경 정보로서 입력된다. 기하학 및 디자인 파라미터는 건물의 위치 및 높이, 건물의 재료, 토지 피복 등으로, 이들을 통해 공간이 구현된다. 식생 정보는 개별 목의 수고, 수형, 잎의 밀도(Leaf area density, LAD), 침엽·활엽, 상록·낙엽, 배식 등으로, 이들은 입력된 수목 캐노피와 대기 사이의 에너지 교환 등의 기작에 영향을 미친다. 이렇게 입력된 파라미터는 모델의 계산 단계에서 몇 가지 특정 모듈을 거쳐 아웃풋으로 도출된다.

모델의 종류에는 대기 모듈, 태양복사열 모듈, 건물 모듈, 토양 모듈, 식생 모듈 등이 있다. 열환경을 평가함에 있어 식물 기작에 초점을 맞춘 연구에서

는 특히 식생모델이 중요한데, 광 투과율, 증발산 등 다소 복잡한 특성이 반영되어야 하기 때문이다(Yang et al., 2019). 이 조건들을 반영하기 위하여 모델에서는 여러 수식을 반영하며, 모델의 정확성 향상을 위하여 일부 모델에서는 경험상수 혹은 경험식을 반영하거나 LAD, LAI 등 수식을 도입한다. 수식 2는 Lindberg와 Grimmond가 제안한 평균 복사 플럭스 밀도(Mean radiant flux density)로(Lingerg et al., 2011), 태양 빛과 식물이 있는 도시 환경에서 태양의 고도와 하늘시계지수(Sky view factor)를 고려하여 단파(Shortwave)⁵⁾와 장파(Longwave)⁶⁾의 흡수, 반사, 전달 과정을 반영한다. 이는 3차원 장파복사($W m^{-2}$) 및 단파복사($W m^{-2}$)의 모든 필드의 합으로 정의된다:

$$R = \xi_k \sum_{i=1}^6 K_i F_i + \varepsilon_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad (W m^{-2}) \quad \text{수식 2}$$

R = Mean radiant flux density ($W m^{-2}$)

L_i = Longwave ($W m^{-2}$)

K_i = Shortwave ($W m^{-2}$)

F_i = Angular

ξ_k = Absorption

ξ_p = Emissivity

실제 식물 기작 메커니즘을 반영하기 위해 다수의 모델에서는 본 수식에 실험에 의한 파라미터를 반영한다(Oke et al., 2002; Robitu et al., 2006). 일부 모델은 LAD 및 전달 경로와 관련된 복사식을 반영하며(Lin, 2004), 일부 연구자는 잎의 특성에 따른 상수 값을 제공한다(Lingerg et al., 2011). ENVI-met과

5) 단파(Shortwave): 자연 열원인 태양에서 발산되는 비교적 짧은 파장대의 전자기파. 단파가 표면에 부딪히면 흡수, 반사, 투과의 반응이 일어난다. 지구는 입사된 단파복사열로 인해 자체적인 열을 지니게 되고 온도를 갖게 된다 (박채연 외, 2017)

6) 장파(Longwave): 지구 표면에 흡수된 단파가 반사가 되면 장파로 전환됨. 단파와 장파는 계속해서 흡수, 반사, 투과의 과정을 반복하게 되는데, 이로써 표면이 흡수하는 복사열이 결정된다 (박채연, 2017)

같은 일부 3차원 모델에서는 LAI와 관련된 플럭스 감소 계수를 반영한다 (Bruse, 2004).

수목이 기후환경에 미치는 또 하나의 주요 영향은 항력에 의한 공기 흐름 감속이다. 이런 효과는 수목 캐노피로 설정되는 셀에 momentum sink 및 난류가 적용되는 피상속도에 기초한 다공성 물질 방식을 적용함으로써 처리하게 된다(수식 3) (Yang et al., 2019):

$$Su_i = -\rho LADc_d U u_i \text{ (Pa m}^{-1}\text{)} \quad \text{수식 3}$$

Su_i = Momentum sinks

ρ = Air density (kg m⁻³)

C_d = Vegetation

U = Wind speed (m s⁻¹)

u_i = Wind velocity component (m s⁻¹)

시뮬레이션 모듈에서는 기류와 수목 캐노피 간 난류 상호작용 분석을 위하여 κ 방정식(수식 4) 및 ε 방정식(수식 5)처럼 기존 방정식에 추가 수식을 포함시킨다. β_p , β_d , $C_{\varepsilon 4}$, $C_{\varepsilon 5}$ 는 경험 상수로, 도시 수목의 CFD 시뮬레이션 모델링과 관련된 광범위한 검토를 통해 도출되었다(Buccolieri et al, 2018).

$$S_k = \rho LADc_d (\beta_p U^3 - \beta_d U k) \text{ (kg m}^{-1} \text{s}^{-3}\text{)} \quad \text{수식 4}$$

$$S_\varepsilon = \rho LADc_d (C_{\varepsilon 4} \beta_p \frac{\varepsilon}{k} U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d U \varepsilon) \text{ (Kg m}^{-1} \text{s}^{-4}\text{)} \quad \text{수식 5}$$

S_k , S_ε = Transport equations of momentum sinks

ρ = Air density (kg m⁻³)

C_d = Drag coefficient of the vegetation

U = Wind speed (m s⁻¹)

u_i = Wind velocity component ($m\ s^{-1}$)

$\beta_p, \beta_d, C_{\varepsilon 4}, C_{\varepsilon 5}$ = Empirical constants

한편, 증발작용에 의한 식생의 열과 수분의 이동을 모사하기 위하여 열과 습도 모델이 이용된다. 식생 캐노피 표면의 실험 온도는 Shimokawa et al., (1996)의 연구에서 제안하였으며, 일부 모델은 식생의 에너지 균형 방정식을 반영한다(수식 6)(Shashua et al., 2002). 수식 6은 수목 캐노피에 의해 흡수된 순 에너지를 나타낸다.

$$\Delta Q(t) = \Delta Q_E(t) + \Delta Q_p(t) + \Delta Q_H(t) \ (Wm^{-2}) \quad \text{수식 6}$$

ΔQ = Net energy absorbed by the canopy

ΔQ_E = Energy of vegetation evaporation

ΔQ_p = Energy stored by the vegetation

ΔQ_H = Heat transfer between vegetation and the
surrounding air

모델 중에서도 ENVI-met은 식생과 물의 균형 모델을 가장 포괄적으로 포함하며, LAI, 식물 뿌리 면적 계수, 환경 물리량의 파라미터 관계를 설정함으로써 열과 습도 환경이 다른 모델에 비해 잘 반영되는 것으로 평가되고 있다 (Yang et al., 2019).

■ 시뮬레이션 모델 선정

Yang et al.(2019)의 리뷰 논문에서 식생평가 모델을 시뮬레이션 한 97개의 연구 분석 결과, Energy Balance Model(EBM)과 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 두가지의 모델이 사용된 것으로 확인되었다. EBM의 경

우, 수목의 형상 설정만 가능하며 독립적인 속성을 입력하지 못해 수목이 장애물로 인식되며, 물체간 다중반사가 반영되지 않아 도시 수목에 의한 미기후를 평가하기에 적합하지 않다고 판단하였다. CFD 모델 중 Open FOAM, FLUENT, STAR-CCM+는 공기 흐름에 대한 공기 역학 및 열 영향을 분석할 수 있는데, 다수의 연구에 의하면 식생에 의한 공기 순환이나 대기질 위주의 분석이 진행되었다. ENVI-met은 증발산에 의한 냉각효과를 평가할 수 있으며, 식생과 대기, 복사, 토양, 난류와의 상호작용을 평가할 수 있어 도시 미기후에 미치는 수목의 영향을 평가하기에 적합하다. 이는 본 연구에서 분석하고자 하는 취지와 가장 잘 맞아 본 연구에서는 ENVI-met을 활용하여 시뮬레이션을 진행하고자 한다.

제3절 선행연구 고찰

표 2 ENVI-met을 활용한 도시 열환경 평가 관련 선행연구

저자(년도)	제목	내용
Ng et al.(2012)	A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong	홍콩의 고밀도 도시구조를 토대로 ENVI-met 모델을 활용, 모형을 제작하여 교목-관목-지피 식재, 녹피율, 건물 높이에 따른 도시 온도변화를 분석하였음. 결과적으로 녹피율이 높고 교목 식재일수록 효과가 컸음을 보였으며, 건물 높이가 낮을수록 보행권에 영향을 미치는 옥상녹화 효과가 큰 것으로 확인됨.
Middel et al.(2014)	Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones	도시 형태와 조경 유형이 반건조지역 여름철 미기후에 미치는 영향을 알아보기 위한 연구로, 여름철 온도를 개선하기 위해 LCZ 분류 체계에 기반하여 서로 다른 도시 형태를 대상으로 선정하고, 세 가지 경관 디자인을 각각 적용하여 시뮬레이션 분석을 진행함. 결과는 온도 분포에 대류가 중요하며, 국소적으로는 수목 혹은 구조물의 그림자와 밀접한 관련이 있음을 보임. LCZ 개념이 계획 및 설계 목적에 유용하다는 점을 시사함.
Tan et al.(2016)	Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment	고밀 도시에서 도시의 녹지에 대한 설계 전략을 서술하여 주간 UHI 효과를 완화하는 것을 목표로 함. 설계 전략으로 SVF와 바람길 기반 설계 방식을 제안하였으며, 이들과 수목의 관련성을 평가하였음. 결과적으로 수목은 바람 방향으로 배치한 경우가 바람을 막을 때보다 2배 더 효과적인 것으로 분석되었으며, 적절한 계획과 함께 식재하는 것이 UHI 완화에 보다 효과적임을 시사하였음.

Morakinyo & Lam (2016)	Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort	가로수의 배열 및 위치에 따른 열 쾌적성에 관하여 연구함. 연구는 가로수 위치 4종류, 수고 유형 2종류로 분류되어 진행되었음. 결과적으로 도로 양쪽에 가로수를 심은 유형이 가장 큰 열 개선 효과를 보였으며, 다음으로 가로수가 도로 중앙에 위치한 경우 열 쾌적성 저감에 효과가 있음을 보임. 길의 한쪽에만 가로수가 심어진 경우에는 특정 시간대에만 효과가 상승하는 것을 확인하였음.
Morakinyo et al. (2017)	Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study	4가지 기후와 3가지 도시 밀도 하에서 4가지 유형의 옥상녹화가 실외 및 실내 온도의 냉각효과에 미치는 영향에 대해 분석함. 결과적으로 옥상녹화 녹지의 밀도보다는 도시구조 밀도에 의한 영향이 더 컸으며, 건조한 지역에서 냉각효과가 더 뛰어났던 것으로 분석됨.
Cheung et al.(2018)	Comparing the cooling effects of a tree and a concrete shelter using PET and UTCI	도시지역의 수목과 인공구조물의 그림자로 인한 냉각효과를 기온, UTCI에 대해 분석한 결과, 수목이 낮 동안 평균 0.6° C (Air temperature), 2.5° C (UTCI)만큼 수목이 인공구조물보다 평균적으로 0.2° C (Air temperature), 2.0° C (UTCI) 더 뛰어남을 확인하였음
Ren Yiwel (2018)	A Study on the outdoor thermal comfort of pedestrians in the commercial streets	서울시 보행권의 열 쾌적성 개선을 위한 식재와 피복 재료의 효율적 설계를 목적으로 식재 및 피복 재료에 관한 시나리오를 설정하고 이를 시뮬레이션 분석함. 결과적으로 최적의 식재 간격 및 포장 재료를 도출하였으며, 식재 혹은 포장만 변경하더라도 열 쾌적성이 개선됨을 시사하였음.

Li et al.(2019)	Optimization of vegetation arrangement to improve microclimate and thermal comfort in an urban park	도시에 위치한 공원의 적합한 미기후 설계를 위하여 식생 배열에 따른 미기후 및 열 쾌적성 분포를 분석한 연구. 도시공원 환경에서는 밀도가 높은 다층식재가 최상의 안락함을 줄 수 있으며, 더운 계절 열 쾌적성에 영향을 미치는 주요 요인은 평균복사온도임을 밝힘.
권유진 외 (2019)	미시적 열섬현상 저감을 위한 도시 가로수 식재 시나리오별 분석 - 서울시를 대상으로 -	도시 가로수 식재의 패턴별 온도 저감 효과를 시뮬레이션 분석한 연구로, 7가지의 가로수 식재 시나리오를 식재 간격, 식재 열 수 등을 기준으로 설계하여 온도 저감 차이를 분석하였음.
Amir Aboelata (2020)	Vegetation in different street orientations of aspect ratio (H/W 1:1) to mitigate UHI and reduce buildings' energy in arid climate	중형비가 1:1인 거리에 최적의 수목 비율을 찾아내고자 세 가지 식재 시나리오에 대하여 시뮬레이션을 진행함. 결과적으로 교목은 모든 방향의 거리에서 기온을 낮추는데 효과적이지 않았고, 잔디가 모든 거리에서 효과적임을 밝혔음. 열 쾌적성(PET)의 경우 50% 식재율일 때 모든 방향의 거리에서 효과적임을 밝힘. 본 연구에서는 수목이 기온을 낮추는데 효과적이지 않으며, 열 쾌적성을 향상시키는데 효과적이라는 것을 발견하였음.
Nadia Assaf (2020)	Green rooftops' mitigation potential on urban heat island	그린인프라 기능을 하는 옥상녹화의 도시 열섬 효과 완화 가능성을 평가한 연구로, LCZ 분류 체계를 기반으로 도시 유형을 구분하고 옥상녹화의 피복률을 설정하여 각 경우에 대한 기온 저감량을 도출하였음.

ENVI-met을 활용하여 도시 열환경을 분석한 연구 동향은 표 2와 같다. 2010년대 초반 진행되었던 Ng et al.(2012)의 연구에서는 도시 지역의 식생 적용 시 교목-관목-지피의 차이, 녹피율 차이를 주어 대기 온도 변화를 분석하

여 가장 효율이 높았던 경우를 도출하였다. 2010년대 중반에는 Local Climate Zone (LCZ), 하늘시계지수(sky view factor, SVF), 바람길, 종횡비(aspect ratio) 등 개념을 도입하여 분석을 진행하였다(Middel et al., 2014; Tan et al., 2016; Ren Yiwel, 2018). Middel et al.(2014)은 LCZ 분류 체계별 대상지를 선정하여 세 가지 특성의 경관녹지 시나리오를 적용하였으며, 결론적으로 LCZ 유형에 따라 효과적인 녹지 조성 패턴에 차이가 났음을 시사하였다. 2010년대 중후반 부터는 다수의 연구에서 도시 열환경 분석에 미기후뿐 아니라 열 쾌적성을 평가 지표로 선정하고 있다. Perini et al.(2017), Ren Yiwel (2018), Li Yingnan (2019), Yang et al. (2020)은 열 쾌적성 지표로 UTCI를, Cheung et al. (2018)은 UTCI와 PET를, Morakinyo & Lam (2016)과 Amir Aboelata (2020)은 PET를 선정하였다. 한편, 최근 다수의 연구에서는 가로수, 옥상녹화 등 특정 도시 녹지 유형을 우선적으로 선정하고, 그 단일 녹지 유형에 대한 식재 간격, 엽면적밀도(leaf area density, LAD), 녹피율 등 세부적 조건을 시나리오로 설정하여 열 환경 분석을 진행하였다(Morakinyo & Lam, 2016; Morakinyo et al., 2017; Cheung et al., 2018; Li et al., 2019; 권유진 외, 2019; Amir Aboelata, 2020).

선행연구 고찰 결과, Middel et al. (2014)은 도시의 열 개선은 식생 및 피복 재료의 기능뿐 아니라 도시의 형태 및 공간배열에 달려있다고 시사하였으며, 열 문제가 심화되고 있는 도시 카이로의 한 거리를 대상지로 분석한 Amir Aboelata (2020)의 연구에서는 열 개선에 교목 식재가 유리하다는 통념을 깨고 잔디 피복이 모든 구역의 거리에서 효과적임을 밝혔다. 또한, 같은 식재계획이라 할지라도 연구 대상지의 구조 및 기후 특징에 따라 개선되는 정량적인 수치는 다르다. 이는 대상지의 도시 구조, 기후대 등 다양한 요인에 따라 효율적인 식재 기법에 차이가 발생하며 대상지마다 분석이 필요함을 시사한다. 한편 최근 연구로 올수록 분석의 지표로 열 쾌적성을 채택하고 있어, 미기후 분석과 더불어 열 쾌적성 분석의 중요성도 제고되고 있음을 확인할 수 있다.

국내 연구 중 ENVI-met을 활용한 고밀 시가화지역의 열환경 시뮬레이션 분

석을 살펴보면, 대구광역시 남구 저층 고밀 시가화지역에 옥상녹화 적용율에 따른 차이를 기온으로 분석한 연구(김대욱 외, 2013), 서울시 종로구 상업지역을 대상으로 종횡비 차이별로 가로 식재 간격 및 소규모 패치 적용, 피복 재료 차이를 주어 미기후 및 열 쾌적성 변화량을 도출한 연구(Ren Yiwel, 2018), 서울시 강남구를 대상으로 가로수 식재 시나리오별 기온을 분석한 연구(권유진 외, 2019), 서울시 전역을 LCZ 기반으로 분류한 뒤 옥상녹화 적용율에 따른 차이를 기온 저감량으로 도출한 연구(Nadia Assaf, 2020) 등 녹화 전략에 따른 여러 연구가 진행되고 있다.

이처럼 하늘시계지수, 종횡비, LCZ 분류 등 도시 구조를 반영한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 식재 시나리오와 관련해서는 대부분 단일 혹은 일부 녹지 유형에 초점을 맞추어 열 저감 시나리오를 전개하는 연구가 대부분으로, 분석 대상지에 적용 가능한 모든 식재계획을 고려한 연구는 진행되지 않았다. 이를 고려한 연구는 도시계획 및 식재계획 중 녹지 총량이 한정된 상황에서 도심 열 저감을 위한 녹화 효율을 극대화할 수 있는 방안이 될 수 있다. 따라서 분석 장소에 적용되는 도시 녹지를 분류하는 과정과 분류된 녹지 유형에 따른 개선 효과를 밝히는 과정은 중요하다.

제3장 연구 방법

제1절 연구 방법

1. 대상지 개요

연구 대상지는 서울시 강남구 역삼동 일대 저층 고밀 시가화지역으로, 분석 규모는 미기후 평가 및 프로그램 구동 사양을 고려하여 200 m × 200 m 로 설정하였다. 평가 범위의 건폐율은 41.48%이었으며, 25개 분석 지점을 기준으로 하늘시계지수 0.58, 종횡비 0.8로 분석되어(표 3), Oke(2004)가 제안한 LCZ 분류 기준을 만족한다(표 4). 또한 대상지의 열환경 표준편차는 0으로, 서울시 불투수 비율이 높은 저층 시가화지역 열환경의 표준으로 볼 수 있다(그림 7). 열환경 분석에는 광역규모 열환경 평가에 용이한 Landsat Archives - Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor)의 위성 영상 열적외선 밴드가 활용되었다⁷⁾. 영상은 2016~2018년 여름철 주간 중 could cover가 없는 맑은 날에 해당하였던 2017년 8월 26일 데이터이며 분석 레이어를 30m×30m로 세분화하였다.

표 3 대상지 정보

대상지	대상지면적 (m ²)	건물면적 (m ²)	건폐율 (%)	하늘시계 지수	종횡비	토지이용 특성
역삼동 일대	40,000	16,592	41.48	0.58	0.8	주거지역

7) Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS의 위성영상 데이터를 활용한 2017년 8월 26일 30m*30m 격자 단위의 서울시 지표면 온도 결과는 서울연구원으로부터 제공받았습니다.

표 4 Local climate zone compact low-rise 유형에 대한 기하학적 및 표면 피복 특성의 값

Local climate zone (LCZ)	Building surface fraction	Sky view factor	Aspect ratio	Impervious surface fraction	Pervious surface fraction	Height of roughness elements	Terrain rough. class
Compact low-rise	40-70	0.2-0.6	0.75-1.5	20-50	<30	3-10	6

자료: Stewart & Oke(2012)

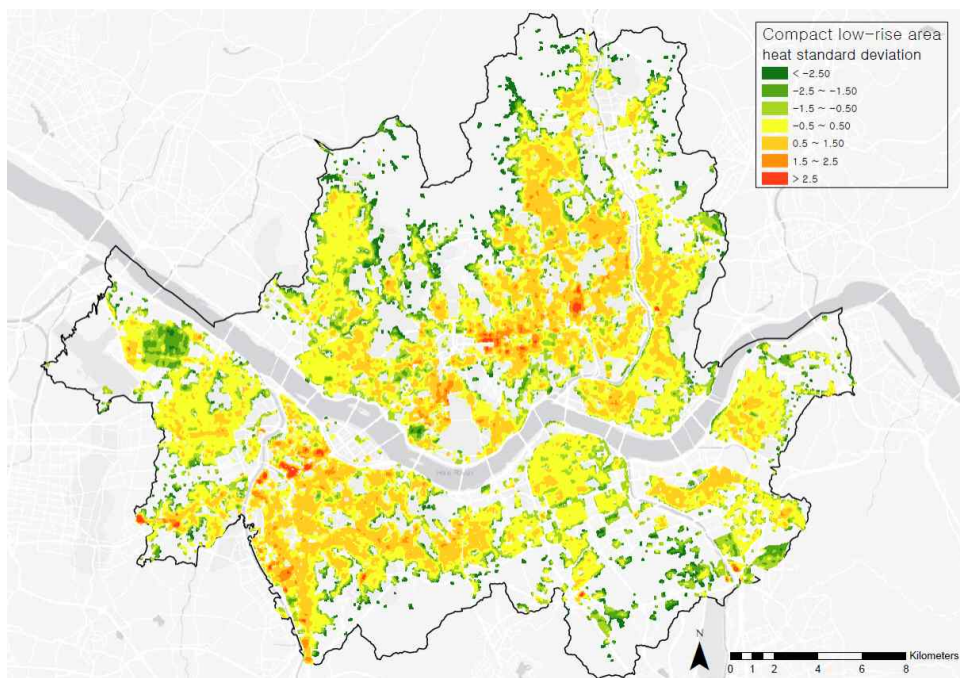


그림 7 서울시 불투수 비율이 높은 저층 시가화지역의 열환경 표준편차(초록색:좋은~붉은색:나쁨)

자료제공: 서울연구원

2. 식재 시나리오

도시 지역의 배식은 지면부 수목, 벽면녹화, 옥상녹화, 오픈스페이스의 4가지 주요 형태로 구성된다(Norton et al., 2015). 도시에서 지면부 수목은 여러 형태로 존재하는데, 연구 대상지의 경우 지면부 수목은 도로변 가로와 건물변 가로로 구분된다. 벽면, 옥상, 오픈스페이스의 경우, 녹화 형태 그대로 대상지 반영이 가능하다. 따라서 대상지 특성을 반영하여 최종적으로 연구에 적용하는 녹지 유형은 도로변 가로, 건물변 가로, 오픈스페이스, 벽면, 옥상으로 총 다섯 가지 유형으로 분류하였다. 또한 녹지 유형별로 녹지의 양에 차이를 두어 표 5와 같이 시나리오를 설정하였다. 시나리오 A는 어떠한 식재도 적용하지 않은 소극적 녹화 상태를, 시나리오 C는 식재 가능 범위에 최대치의 녹지가 적용된 적극적인 녹화 상태를, 시나리오 B는 최대치의 절반에 해당하는 녹지량을 적용하여 현실적인 상태를 상정하였다. 이때 최대치의 녹화는 선형 녹지에 해당하는 가로 유형의 경우 가로수 간격 기준을, 면형 녹지에 해당하는 오픈스페이스 유형의 경우 수관 간 간격 0m로, 면형 녹지에 해당하는 벽면, 옥상의 경우 녹피율이 100%인 형태로 설정하였다. 최종적으로 총 18가지 시나리오에 대하여 시뮬레이션 분석을 진행하며 각 경우의 열 쾌적성을 도출하였다.

표 5 식재 시나리오

시나리오	녹지 유형					
	도로변 가로	건물변 가로	오픈 스페이스	벽면	옥상	모든 녹지유형
	식재 간격			녹피율		식재 간격
A	0m	0m	0m	0%	0%	가로, 오픈스페 이스의 간격 벽면, 옥상의 녹피율
B	12m	16m	12m	50%	50%	
C	6m	8m	6m	100%	100%	

제2절 프로그램 구동

1. 미기후 산출

■ ENVI-met 구동 과정

ENVI-met의 기본 레이아웃은 3D 모델, 1D 모델, 토양 모델 및 네스팅 영역으로 구성된다. 기본 3D 모델은 x축, y축, z축의 3차원 공간으로 설계되며 건물, 식생, 토양 및 면적 등 공간을 나타내는 요소가 배치된다.

3D 수치 모델에 모델링을 하기 위해서는 우선 분석 공간을 그리드로 변환해야한다. 단일 그리드가 작을수록 시뮬레이션 결과의 해상도는 더욱 정밀해지며, x축, y축, z축 값을 입력하여 3차원의 기본 셀 크기를 설정할 수 있다.

토양 모델은 지표면과 지표면 사이의 열 전달을 계산하는 데 사용되며, 식생의 증발산과 밀접한 관련이 있는 토양 수분 함유율에 대한 정보를 제공한다. 네스팅 영역은 기본 3D 모델을 둘러싸는 베퍼 그리드로 구성되는데, 모델의 구성물을 경계로부터 멀리 유지하고 경계부에서 생성된 간섭을 피하여 결과의 정확성을 향상시키는 기능을 한다.

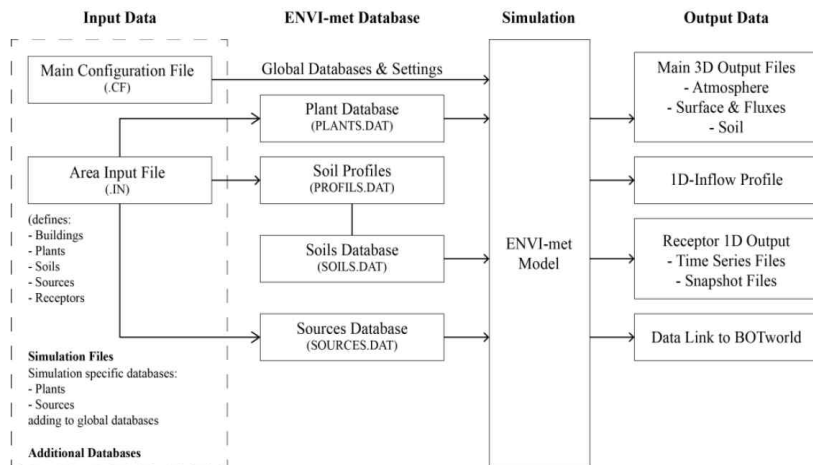


그림 8 ENVI-met 구동 과정

자료: www.envi-met.com

■ ENVI-met 모델의 개요

ENVI-met은 Finite Difference Method (FDM)을 사용한 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD) 모델을 포함하며, 공간의 그리드와 시간의 구간에 대해서는 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 통해 값을 구한다(수식 7).

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad \text{수식 7}$$

RANS 방정식은 유체 흐름에 대한 시간 평균 운동 방정식으로, 매시간마다 이류를 구하는 것이 아닌 어느 정도 시간에 대한 평균 속도로 이류가 구해진다는 점이 특징이다. 대기 이류 방정식 및 확산 방정식은 암시적 방식으로 구현되어 프로그램이 수치적으로 안정을 유지할 수 있고, 그렇기 때문에 슈퍼컴퓨터가 아닌 일반 컴퓨터에서 실행이 가능하다는 장점을 지닌다.

2. UTCI 산출

UTCI는 환경 요인에 해당하는 기온, 습도, 평균복사온도, 풍속과 개인 요인에 해당하는 대사율 및 의복 수준이 변수로 작용하여 산출된다. 본 연구에서는 UTCI 산정에 rBiometeo 패키지를 활용하였으며, 환경 요인에 해당하는 기온, 평균복사온도, 풍속, 상대습도를 ENVI-met을 이용하여 산출하였다. rBiometeo를 통한 UTCI 산출에서는 개인 요인에 해당하는 대사율이 $135W m^{-2}$ 로, 여름 환경에서의 의류 단열재가 0.5 clo 로 설정되어있다(Blazejczyk et al., 2012; Havenith et al., 2012). 환경 요인의 경우, 기준 조건은 실제 상황과 동일한 조건인 모델의 기온(T_a)이며, UTCI와 기온의 차이는 평균복사온도(T_{mrt}), 풍속(va), 상대습도(RH)에 의해 발생한다(Blazejczyk et al., 2013). UTCI 산정식은 수식 8과 같으며(Blazejczyk et al., 2013), 본 연구에서는 ENVI-met을 통해 산출된 기온, 평균복사온도, 풍속, 상대습도 값을 대입하여 RStudio에서 UTCI를 산출하였다.

$$\begin{aligned} UTCI &= f(T_a; T_{mrt}; va; RH) \\ &= T_a + Offset(T_a; T_{mrt}; va; RH) \end{aligned} \quad \text{수식 8}$$

UTCI = Universal thermal climate index (°C)

T_a = 기온 (Air temperature) (°C)

T_{mrt} = 평균복사온도 (Mean radiant temperature) (°C)

va = 풍속 (Wind speed) (m/s)

RH = 상대습도 (Relative humidity) (%)

3. 입력자료 구축

■ 공간의 구현

공간의 크기는 $x = 200\text{ m}$, $y = 200\text{ m}$, $z = 60\text{ m}$, 그리드 하나의 치수는 $x = 2\text{ m}$, $y = 2\text{ m}$, $z = 2\text{ m}$ 로 설정하였다. 모델 상에 공간을 구현하기 위하여 국토정보플랫폼의 축척 1:5000 연속수치지형도, 네이버 위성 지도 및 네이버로 드뷰(<https://map.naver.com/v5/>)를 이용하였다. 연속수치지형도를 통해 건물 면적 및 층수, 도로 정보를 구현하고, 위성영상과 로드뷰를 통해 대상지의 모습을 확인하였다. 추가적으로 실제 보행권, 녹지조성 현황 등 항공사진 및 로드뷰로 파악하기 어려운 부분은 현장답사를 통해 파악하고 이를 공간 구현에 반영하였다.

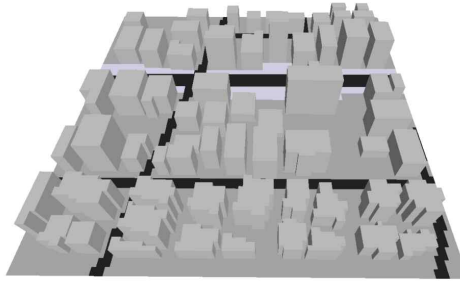
모델의 피복 구현은 현황을 단순화하여 아스팔트, 콘크리트, 진흙 세 가지 종류로 구분하였다. 피복 재료에 따라 열 환경에 미치는 영향이 달라지는 주원인은 알베도와 방사율에 있다. 본 연구에서는 피복 재료의 알베도와 방사율을 한국 기준으로 사용하고자, 서울연구원에서 분석 사례 값으로 활용하였던 수치를 적용하였다(표 6). 최종적으로 모델에서 구현된 대상지 모습은 그림 9와 같다.

표 6 피복 재료별 알베도 및 방사율 설정값

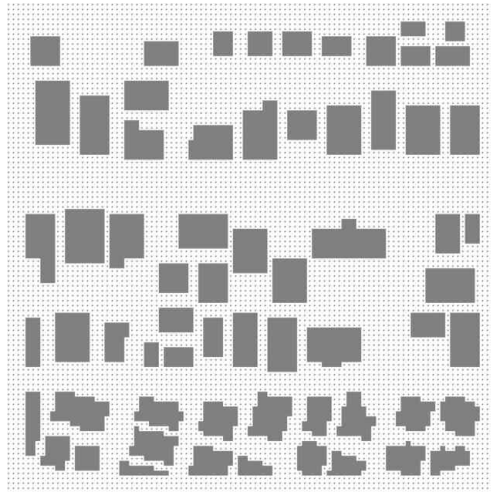
피복 재료	알베도(albedo)	방사율(emissivity)
Asphalt	0.08	0.97
Concrete	0.18	0.96
Loamy soil	0.20	0.98

자료제공: 서울연구원

3D 뷰



건물 및
식재



토지
피복

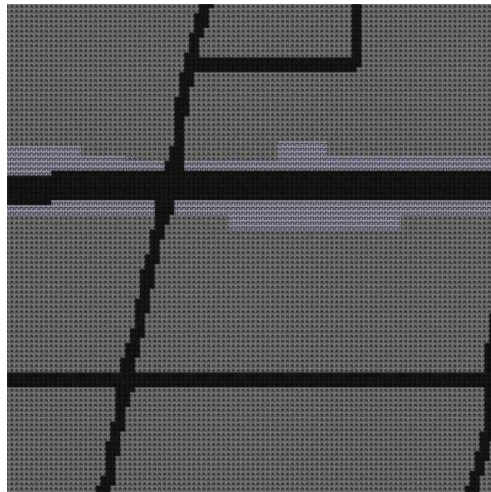


그림 9 대상지의 ENVI-met 구현 모습 - 3D 뷰, 건물 및 식재,
토지 피복

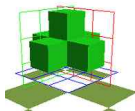
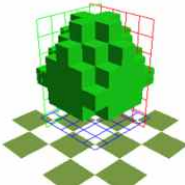
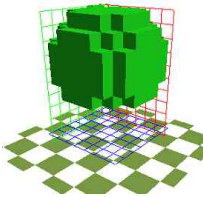
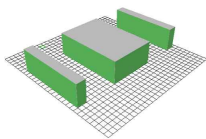
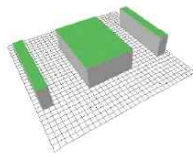
■ 수목 캐노피 구현

ENVI-met에서는 Albero 탭에서 수목을 구현하며, 셀의 기본 단위는 $x = 1\text{ m}$, $y = 1\text{ m}$, $z = 1\text{ m}$ 로 수목의 잎이 구현된다. 따라서 이용자는 원하는 수고, 수관폭, 지하고, 수형으로 3D 상에서 수목을 구현할 수 있다. 또한, 셀 하나당 엽면적밀도를 입력하며, 수목 한 그루의 알베도 및 방사율을 설정할 수 있다. 한편 ENVI-met 4.4에서는 벽면녹화와 옥상녹화를 건물 재료 설정을 통해 구현할 수 있다. 벽면녹화의 경우, 녹화와 벽면 사이에 기판층(substrate layer)을 두어 복사, heat flux 등을 고려할 수 있다.

연구에서 이용하는 수목을 Albedo 상에서 구현한 모습은 표 7과 같다. 수목 A는 수고 3m, 수관폭 3m로 건물변 가로 유형에 식재되며, 수목 B는 수고 7m, 수관폭 5m로 오픈스페이스 유형에 식재된다. 수목 C는 수고 10m, 수관폭 7m로 도로변 가로 유형에 적용된다. 수목 D와 수목 E는 벽면녹화와 옥상녹화를 구현한 모습으로, 잎의 두께를 각각 0.2m, 0.5m로 설정하였다. 모든 수목의 알베도는 일반적인 값에 해당하는 0.22로, 엽면적밀도는 1.1로 설정하였다.

최종적으로 식재 시나리오에 따라 대상지 공간에 수목 캐노피가 반영된 모습은 그림 10, 그림 11과 같다.

표 7 수목 캐노피 구현

구분	성상	수고(m)	지하고(m)	수관폭(m)	엽면적 밀도	알베도
A		3	1	3	1.1	0.22
B		7	2	5		
C		10	4	7		
D		앞의 두께(m)				
		0.2				
E		0.5				

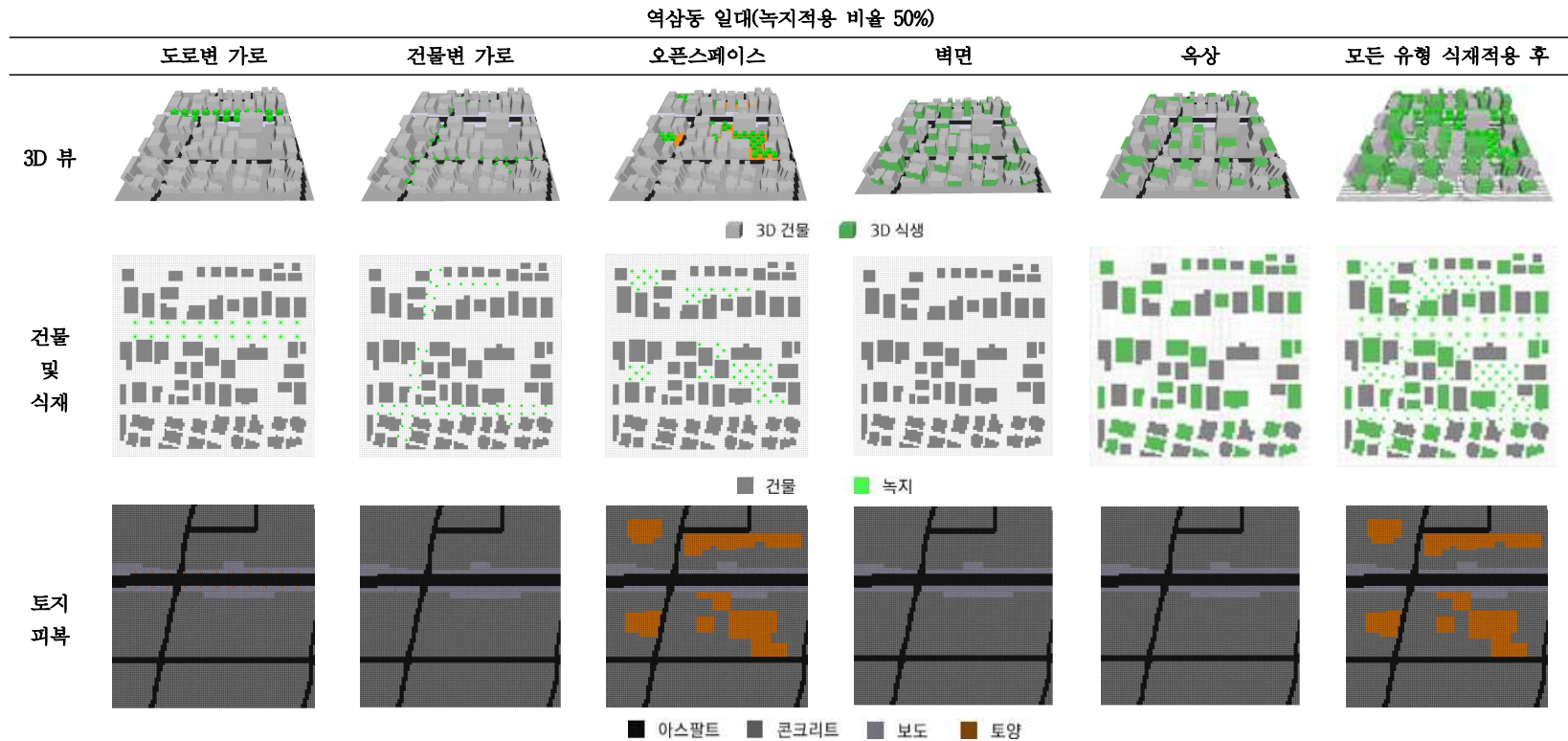


그림 10 역삼동 일대의 ENVI-met 구현 모습(녹지적용 비율 100%) - 3D 뷰, 건물 및 식재, 토지 피복

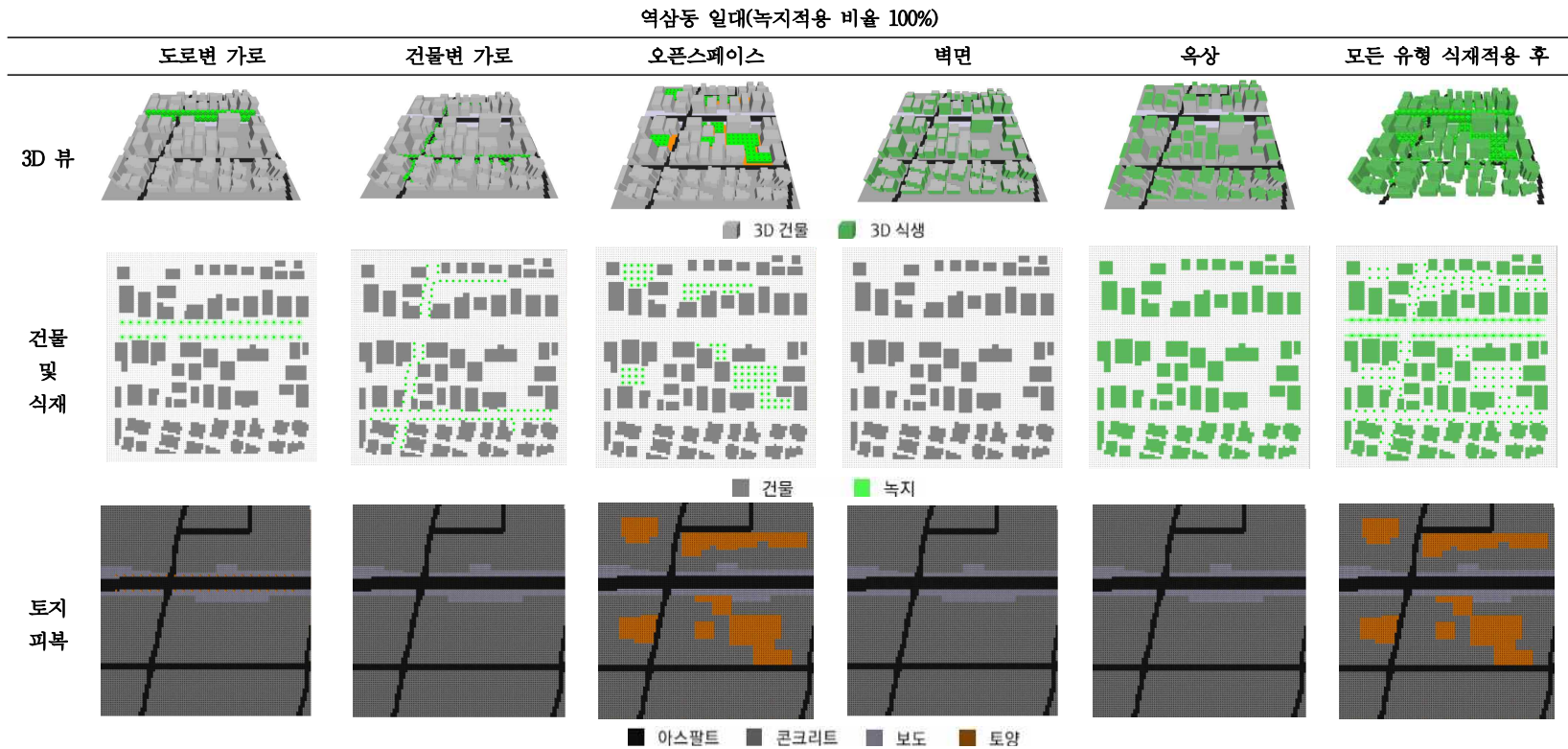


그림 11 역삼동 일대의 ENVI-met 구현 모습(녹지적용 비율 100%) - 3D 뷰, 건물 및 식재, 토지 피복

■ 기상 데이터 구축

ENVI-met 구동에 입력되는 기상 데이터는 표 8, 표 9와 같다. 입력이 필요한 기상 파라미터는 일평균 기온(℃), 습도(%), 10m 높이에서의 풍속(m/s), 풍향(°)과 하루 1시간 간격의 기온(℃), 습도(%) 데이터이다. 연구에서는 지역별 상세관측자료(AWS)에서 제공되는 데이터를 입력 자료로 활용하였다. 지역별 상세관측자료(AWS)는 분 단위 및 시 단위로 기온, 습도, 풍향, 풍속 데이터를 제공하고 있으며 서울시의 경우 총 29개의 관측소가 있어 구 단위로 데이터 취득이 가능하다. 본 연구에서는 관측소 강남(400) 데이터를 활용하였다(표 8).

분석 일자는 한국 서울시 혹서기의 일반적인 상황을 상정하기 위하여 2017년, 2018년, 2019년 7월 21일 ~ 8월 20일 기간 중 중위수에 해당하는 일자를 3일씩 추출하여 총 9일의 기상자료를 평균하였다. 일자를 선정하는 과정에서 일 강수량이 0을 초과한 비가 오는 날은 제외하였다. 최종적으로 선정된 일자는 2017년 7월 29일, 2017년 7월 30일, 2017년 8월 12일, 2018년 7월 21일, 2018년 7월 27일, 2018년 8월 10일, 2019년 8월 2일, 2019년 8월 19일, 2019년 8월 20일로, 이들의 기온, 습도, 풍속, 풍향에 대한 평균값을 연구의 기상 입력 자료로 활용하였다. 시뮬레이션 분석 시간은 주간 시간대인 6시 ~ 19시로 설정하였다.

토양과 운량과 관련된 자료는 프로그램에서 추가 정보로 입력할 수 있는데, 본 연구에서 토양의 온도, 습도 및 운량은 분석 결과에 영향을 미치는 인자로 판단하여 입력 자료로 활용하였다. 토양 온도 및 운량 자료는 서울 관측소에서 취득할 수 있다(표 9). 토양 습도의 경우 대한민국 서울의 여름철 미기후 및 열 쾌적성 연구 진행 시 입력하였던 수치를 참고하였다(Ren Yiwei, 2018).

표 8 2018년 8월 1일 강남구의 시간별 기온 및 상대습도

시간	기온(℃)	상대습도(%)
0:00	26.71	80.00
1:00	26.43	81.00
2:00	25.99	84.11
3:00	25.69	85.00
4:00	25.36	86.22
5:00	25.10	86.78
6:00	25.06	86.89
7:00	25.70	84.56
8:00	26.89	77.78
9:00	28.19	71.33
10:00	29.50	66.00
11:00	30.37	60.78
12:00	31.39	55.67
13:00	32.67	51.56
14:00	33.18	48.56
15:00	33.20	48.78
16:00	33.31	48.89
17:00	33.03	48.78
18:00	32.31	51.67
19:00	31.31	56.11
20:00	30.08	61.67
21:00	29.42	65.33
22:00	28.83	68.33
23:00	28.39	71.50

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 4월 1일)

표 9 강남구 기상입력자료

목록		입력 자료
시간	일자	2017년 7월 29일, 2017년 7월 30일, 2017년 8월 12일, 2018년 7월 21일, 2018년 7월 27일, 2018년 8월 10일, 2019년 8월 2일, 2019년 8월 19일, 2019년 8월 20일의 평균
	시물레이션 시간	6:00 ~ 19:00
바람	10m 높이에서의 풍속(m/s)	1.09
	풍향(°)	139.91
기온(°C)		29.1 (시간별 데이터 표 10 참고)
습도(%)		67.8 (시간별 데이터 표 10 참고)
토양	Upper layer (0~20cm)	습도 50%, 온도 34.11°C
	Middle layer (20~50cm)	습도 60%, 온도 29.60°C
	Deep layer (50~200cm)	습도 60%, 온도 26.00°C
	Bedrock layer (below 200m)	습도 60%, 온도 23.00°C
운량	하층운량(octas)	0.38
	중층운량(octas)	0.38
	상층운량(octas)	0.92

자료: 지역별상세관측자료(AWS)와 기상자료개방포털(검색일: 2020년 4월 1일)

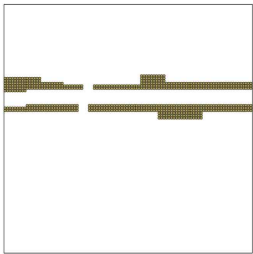
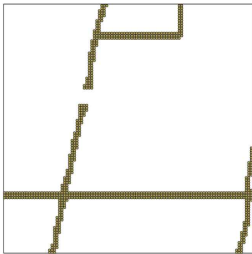
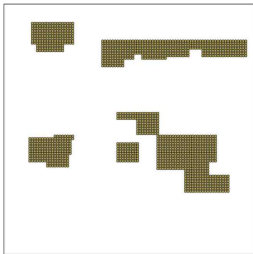
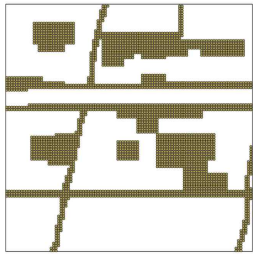
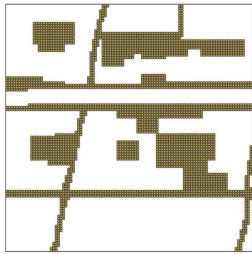
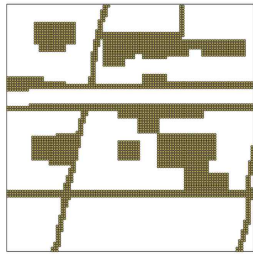
제4장 연구 결과 및 고찰

제1절 시나리오별 평가 범위

연구 대상지는 x축 200m, y축 200m 크기로, ENVI-met 상에서 공간 구현 시 셀 하나의 크기를 2m로 설정하였다. 따라서 x-y 면적은 총 10,000개의 셀로 구성된다. 본 연구의 평가는 보행권 지상 1.4m 높이에서 이루어졌다. 대상지의 전체 보행권 면적은 11,512㎡로 산출하였다.

녹지 유형 시나리오별 평가 구간은 각 녹지 유형이 적용되는 범위와 맞닿은 보행권으로 하였다. 표 10에서는 녹지 유형별 평가 구간 평면도와 평가 셀(지점)의 개수 및 면적을 확인할 수 있다. 도로변 가로 유형의 경우 663개의 셀, 건물변 가로 유형의 경우 749개의 셀, 오픈스페이스 유형의 경우 1,468개의 셀, 벽면 유형, 옥상 유형, 전체 녹지 유형을 적용한 경우는 2,878개의 셀로 결과 분석을 진행하였다.

표 10 시나리오별 평가 범위

녹지 유형	도로변 가로	건물변 가로	오픈스페이스
평가 구간			
셀 개수	663 개	749 개	1,468 개
면적	2,652 m ²	2,996 m ²	5,872 m ²
평가 높이	지상 1.4 m	지상 1.4 m	지상 1.4 m
녹지 유형	벽면	옥상	전체 유형 적용
평가 구간			
셀 개수	2,878 개	2,878 개	2,878 개
면적	11,512 m ²	11,512 m ²	11,512 m ²
평가 높이	지상 1.4 m	지상 1.4 m	지상 1.4 m

제2절 시나리오별 주간 UTCI 평가

1. 시나리오별 주간 UTCI 평가

시나리오별로 한국 여름철 주간에 해당하는 시간인 6시부터 19시까지의 UTCI를 분석하였다(표 11). 그림 12 ~ 그림 17에서는 녹지 적용 비율 시나리오별 보행권의 평균 UTCI 수치 변화를 확인할 수 있다. 대상지에서 평균적인 혹서기 주간에는 UTCI 척도⁸⁾가 No thermal stress (9 °C ~ 26 °C) 부터 Very strong heat stress (38 °C ~ 46 °C) 까지 나타났으며, 7시 혹은 8시 이후부터 19시까지는 모두 Moderate thermal stress (26 °C ~ 32°C) 이상을 유지하여 열적 스트레스를 받는 환경임을 확인하였다.

시나리오별로 살펴보면, 녹지를 적용함에 따라 UTCI 평가 척도의 상위 단계로 진입하는 시간이 지연되거나 도달하지 않았으며, 열 스트레스 하위 단계로 이탈하는 시간이 일러지는 경향이 나타났다. 도로변 가로 유형(그림 12)에서 시나리오 A로 적용된 경우, 평가 범위의 평균 UTCI가 Very strong heat stress 구간에서 지속되는 시간이 4시간 이상으로 나타났다. 반면 시나리오 C 적용된 경우, 평균 UTCI가 38.0°C로 최대치를 기록하여 Very strong heat stress 구간에서의 지속시간이 나타나지 않았다.

오픈스페이스 유형(그림 14)과 벽면 유형(그림 15)도 도로변 가로 유형과 비슷한 경향을 나타냈다. 두 유형 모두 시나리오 A인 경우 평가 범위의 평균 UTCI가 Very strong heat stress 구간에서 지속되는 시간이 5시간 이상으로 나타났다. 시나리오 C의 경우, 오픈스페이스는 평가 범위의 평균 UTCI가 최대 37.6°C를 기록하며 Very strong heat stress 구간에 도달하지 않았으며, 벽면의 경우 평가 범위의 평균 UTCI가 약 2시간 이상 지속되어 Very strong heat stress 구간의 지속시간이 단축됨을 확인할 수 있었다.

8) UTCI 척도 (Universal Thermal Climate Index Category): Extreme heat stress (above +46); Very strong heat stress (+38 to +46); Strong heat stress (+32 to +38); Moderate heat stress (+26 to +32); No thermal stress (+9 to +26); Slight cold stress (+9 to 0); Moderate cold stress (0 to -13); Very strong cold stress (-27 to -40); Extreme cold stress (below -40)

표 11 시나리오별 주간 동안의 시간별 평균 UTCI 및 표준편차

단위: °C

시나리오			6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시
도로변 가로	A	Mean	22.8	25.2	29.8	33.3	35.6	37.0	37.9	39.0	40.2	40.5	39.4	37.4	33.5	29.6
		S.D.	0.2	2.1	3.2	3.1	2.6	2.1	1.7	1.5	1.4	1.8	2.5	2.7	1.9	0.1
	B	Mean	23.3	24.5	28.2	31.7	34.3	35.8	37.0	38.0	38.9	39.0	37.6	35.7	33.0	29.8
		S.D.	0.3	1.4	2.5	2.7	2.5	2.0	1.8	1.6	1.8	2.1	2.2	2.1	1.6	0.1
	C	Mean	23.5	24.4	27.6	30.8	33.3	35.0	36.3	37.3	38.0	37.8	36.7	35.0	32.6	29.8
		S.D.	0.3	1.2	2.0	2.2	2.0	1.7	1.5	1.4	1.6	1.9	2.0	1.8	1.6	0.1
건물변 가로	A	Mean	22.7	24.3	28.3	32.2	35.2	37.7	38.8	39.7	40.1	40.0	38.4	35.8	33.1	29.7
		S.D.	0.2	1.8	3.1	3.2	2.7	1.7	1.0	0.9	1.5	2.1	2.6	2.2	1.5	0.1
	B	Mean	22.9	24.4	28.3	32.0	35.0	37.4	38.6	39.6	40.0	39.8	38.2	35.5	32.9	29.7
		S.D.	0.2	1.8	3.0	3.2	2.8	1.8	1.0	0.9	1.5	2.1	2.6	2.2	1.5	0.1
	C	Mean	23.0	24.4	28.1	31.9	34.8	37.2	38.5	39.5	39.9	39.7	38.1	35.3	32.7	29.7
		S.D.	0.2	1.7	3.0	3.2	2.8	1.8	1.1	0.9	1.5	2.1	2.6	2.2	1.4	0.1
오픈 스페이스	A	Mean	22.7	24.2	28.7	32.3	35.0	36.8	38.0	39.0	40.0	40.4	39.5	37.0	33.3	29.6
		S.D.	0.2	1.7	3.1	3.1	2.7	2.1	1.6	1.4	1.5	1.8	2.4	2.7	1.8	0.1
	B	Mean	23.1	23.9	27.2	30.6	33.2	35.2	36.6	37.6	38.6	38.8	37.5	35.0	32.1	29.4
		S.D.	0.4	1.0	2.0	2.3	2.2	1.9	1.5	1.4	1.6	1.9	2.1	1.9	0.9	0.2
	C	Mean	23.3	24.1	26.8	29.8	32.3	34.3	35.8	36.7	37.6	37.6	36.2	34.1	31.8	29.5
		S.D.	0.5	1.0	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3	1.2	1.5	1.7	1.9	1.3	0.6	0.2
벽면	A	Mean	22.7	24.5	28.8	32.5	35.2	37.1	38.2	39.2	40.1	40.3	39.2	36.7	33.3	29.6
		S.D.	0.2	1.9	3.2	3.2	2.7	2.0	1.5	1.4	1.5	1.9	2.5	2.6	1.7	0.1
	B	Mean	23.1	24.7	28.5	31.8	34.3	36.0	37.2	38.0	39.0	39.3	38.1	35.7	32.4	29.2
		S.D.	0.1	1.8	3.2	3.3	2.9	2.2	1.7	1.5	1.7	2.1	2.7	2.8	1.8	0.2
	C	Mean	23.5	24.9	28.3	31.2	33.5	35.2	36.3	37.1	38.0	38.4	37.1	34.7	31.6	28.9
		S.D.	0.1	1.8	3.2	3.4	3.0	2.4	1.8	1.7	1.8	2.2	2.8	2.9	1.9	0.2
육상	A	Mean	22.7	24.5	28.8	32.5	35.2	37.1	38.2	39.2	40.1	40.3	39.2	36.7	33.3	29.6
		S.D.	0.2	1.9	3.2	3.2	2.7	2.0	1.5	1.4	1.5	1.9	2.5	2.6	1.7	0.1
	B	Mean	22.7	24.4	28.8	32.4	35.1	37.0	38.1	39.1	40.0	40.2	39.1	36.7	33.2	29.6
		S.D.	0.1	0.1	1.8	3.2	3.3	2.9	2.2	1.7	1.5	1.7	2.1	2.7	2.8	1.8
	C	Mean	22.7	24.5	28.9	32.4	35.1	37.0	38.0	39.0	39.9	40.1	39.0	36.5	33.0	29.5
		S.D.	0.2	1.9	3.2	3.2	2.7	2.0	1.5	1.4	1.5	1.9	2.5	2.6	1.7	0.1
모든 유형	A	Mean	22.7	24.5	28.8	32.5	35.2	37.1	38.2	39.2	40.1	40.3	39.2	36.7	33.3	29.6
		S.D.	0.2	1.9	3.2	3.2	2.7	2.0	1.5	1.4	1.5	1.9	2.5	2.6	1.7	0.1
	B	Mean	23.3	24.3	27.2	30.3	32.8	34.7	36.0	36.8	37.5	37.6	36.1	33.8	31.3	28.9
		S.D.	0.3	1.3	2.4	2.8	2.6	2.2	1.8	1.7	1.9	2.2	2.4	2.1	1.3	0.2
	C	Mean	23.8	24.5	26.6	29.0	31.3	33.1	34.5	35.1	35.7	35.6	34.3	32.2	30.3	28.6
		S.D.	0.3	1.2	2.2	2.5	2.4	2.2	1.8	1.7	1.9	2.2	2.4	1.9	1.2	0.3

반면, 건물변 가로 유형과 옥상 유형의 경우 시간별 평균 UTCI와 표준편차 범위가 상당량 일치하여 녹지 적용에 따른 차이가 거의 나타나지 않았음을 확인하였다(그림 13, 그림 16).

모든 녹지 유형을 적용한 경우(그림 17)를 살펴보면, 시나리오 A일 때 평가 범위의 평균 UTCI가 Very strong heat stress 구간에서 지속되는 시간이 5시간 이상으로 나타났다. 시나리오 C인 경우 평가 범위의 최대 UTCI가 35.7℃로 나타나 Very strong heat stress 구간에 도달하지 않았다. 모든 녹지 유형을 적용한 경우에는 시나리오 B인 경우에도 평가 범위의 모든 시간대 평균 UTCI가 38℃ 미만으로 나타나 효과가 있었던 단일 녹지 유형의 시나리오 C 수준의 저감을 한 것을 확인하였다.

도로변 가로

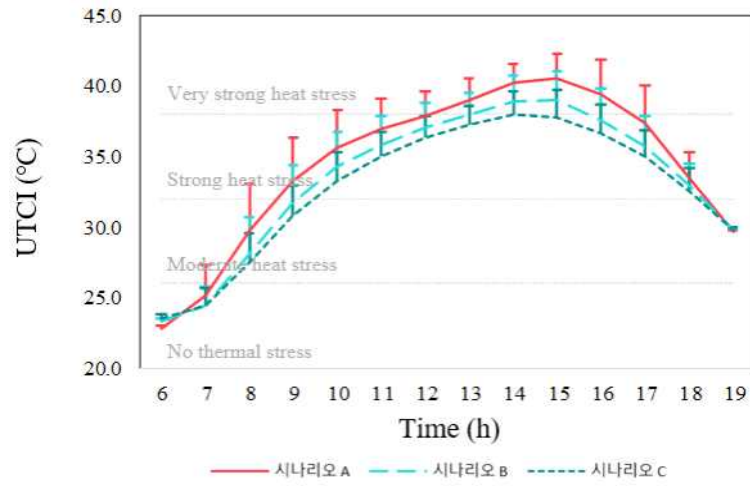


그림 12 도로변 가로 유형의 주간 UTCI

건물변 가로

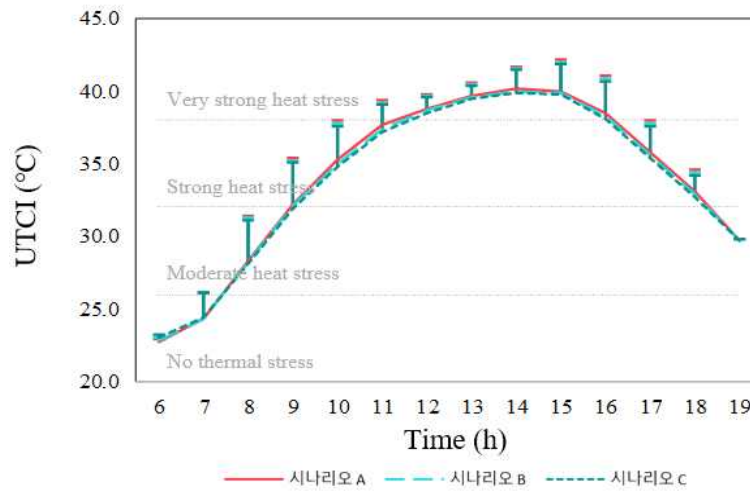


그림 13 건물변 가로 유형의 주간 UTCI

오픈스페이스

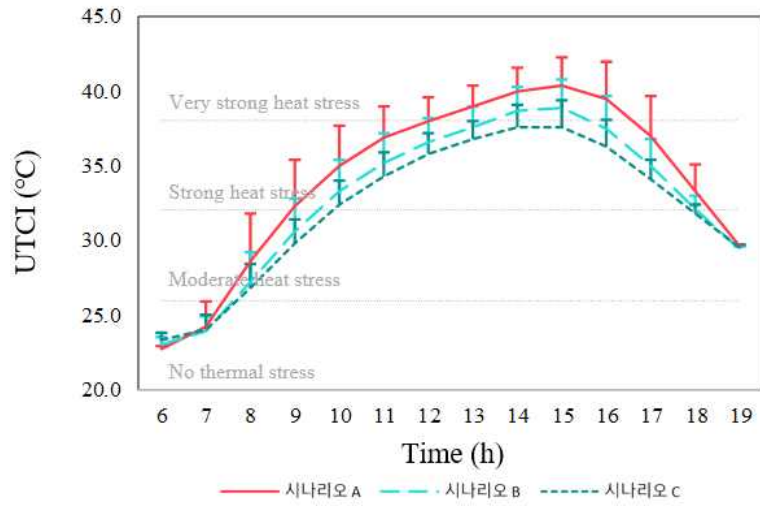


그림 14 오픈스페이스 유형의 주간 UTCI

벽면

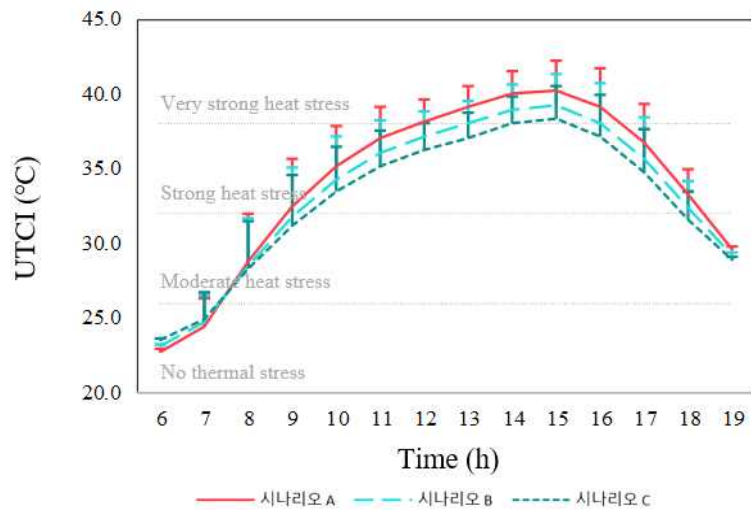


그림 15 벽면 유형의 주간 UTCI

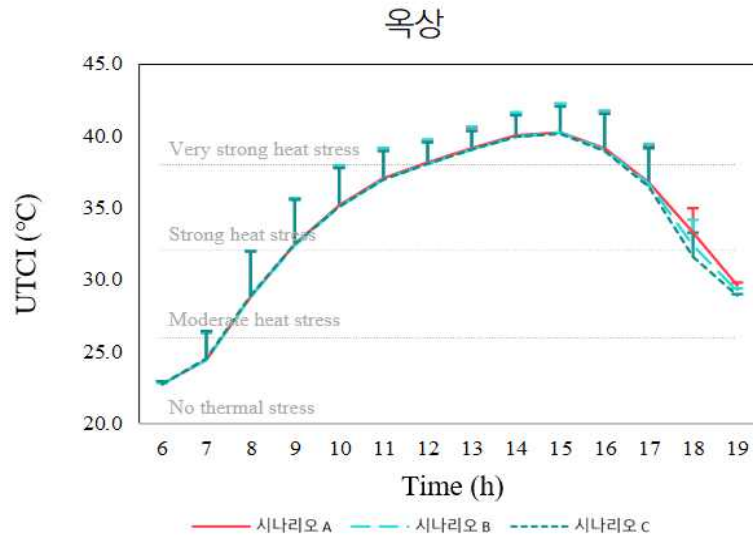


그림 16 옥상 유형의 주간 UTCI

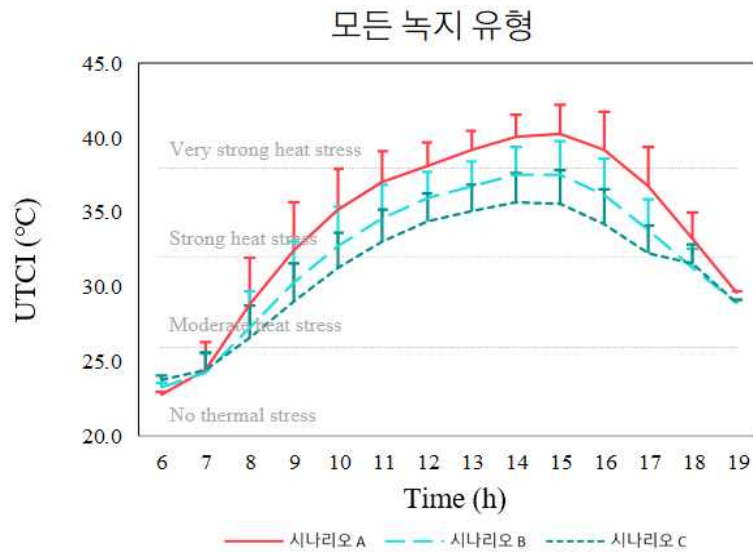


그림 17 모든 녹지 유형 적용 시 주간 UTCI

2. 주간 시간대별 UTCI 감소량 분석

시간대에 따라 녹지로 인한 UTCI의 증감량에는 차이가 있었다. 주간 평균 종합한 결과(표 12), 본 연구에서는 녹지로 인하여 UTCI 저감이 가장 크게 일어나는 시간이 16시로 분석되었다. 다음으로는 17시, 15시 순으로 저감 효과가 큰 것으로 나타났다. 한편, 6시에는 식재가 일어난 모든 경우에 UTCI가 증가하여, 오히려 녹지로 인해 열 쾌적성이 나빠졌음을 확인하였다. 7시와 19시에는 일부 유형에서 UTCI가 증가하는 현상이 나타났다. 이외 시간대에는 모든 경우에 대해 열 쾌적성이 좋아졌음을 확인하였다.

표 12 녹지적용 0% 대비 시간별 UTCI 감소량

단위: ℃

시나리오		6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	MAX
도로변 가로	B	-0.5	0.7	1.6	1.6	1.3	1.2	0.9	1.0	1.3	1.6	1.8	1.6	0.5	-0.1	1.8
	C	-0.7	0.8	2.3	2.5	2.3	1.9	1.6	1.7	2.3	2.7	2.7	2.4	0.9	-0.2	2.7
건물변 가로	B	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.3
	C	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.0	0.5
오픈스 페이스	B	-0.3	0.3	1.4	1.7	1.7	1.6	1.4	1.4	1.3	1.5	2.0	2.0	1.2	0.2	2.0
	C	-0.6	0.2	1.9	2.5	2.6	2.5	2.2	2.2	2.4	2.8	3.2	2.9	1.5	0.2	3.2
벽면	B	-0.4	-0.2	0.3	0.7	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9	0.4	1.1
	C	-0.8	-0.5	0.5	1.3	1.7	1.9	1.9	2.1	2.0	1.9	2.0	2.0	1.7	0.7	2.1
옥상	B	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	C	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1	0.3
전체 유형	B	-0.6	0.2	1.6	2.2	2.4	2.4	2.2	2.4	2.5	2.7	3.0	2.9	2.0	0.7	3.0
	C	-1.0	0.0	2.2	3.5	3.9	4.0	3.7	4.0	4.4	4.7	4.9	4.5	3.0	1.1	4.9
평균		-0.4	0.1	1.0	1.4	1.5	1.5	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	1.7	1.1	0.3	

3. 시나리오별 효과 평가

시나리오별로 주간 시간대 전체의 평균 UTCI를 분석하였다(표 13). 결과적으로 효과적인 녹지 유형은 오픈스페이스 - 도로변 가로 - 벽면 - 건물변 가로 - 옥상 순으로 나타났다(그림 19). 주간 시간 평균한 경우, 오픈스페이스 유형을 시나리오 C로 적용하였을 때 UTCI 1.9℃ 만큼 저감, 시나리오 B로 하였을 때 UTCI 1.2℃ 만큼 저감되었다. 도로변 가로 유형은 시나리오 C일 때 UTCI 1.7℃, 시나리오 B일 때 UTCI 1.1℃ 만큼 저감하였으며, 벽면녹화 유형의 경우 시나리오 C일 때 UTCI 1.3℃, 시나리오 B일 때 UTCI 0.7℃ 만큼 저감하는 것으로 나타났다. 반면, 건물변 가로와 옥상 유형의 경우 시나리오 C일 때 각각 UTCI 0.2℃, 0.1℃로, 시나리오 B일 때 UTCI 0.1℃ 저감하는 것으로 나타나 거의 효과가 없는 것으로 분석되었다.

녹지로 인한 UTCI 저감이 가장 크게 나타나는 시간인 16시에 대해 시나리오별 저감량을 산출한 결과 효과적인 녹지 유형은 주간 평균과 똑같이 오픈스페이스 - 도로변 가로 - 벽면 - 건물변 가로 - 옥상 순으로 나타났다(그림 21). 오픈스페이스 유형을 시나리오 C로 적용하였을 때 UTCI 1.9℃ 만큼 저감, 시나리오 B로 하였을 때 UTCI 1.2℃ 만큼 저감되었다. 도로변 가로 유형은 시나리오 C일 때 1.7℃, 시나리오 B일 때 1.1℃ 만큼 저감하였으며, 벽면녹화 유형의 경우 시나리오 C일 때 1.3℃, 시나리오 B일 때 UTCI 0.7℃ 만큼 저감하는 것으로 나타났다. 반면, 건물변 가로와 옥상 유형의 경우 시나리오 C일 때 각각 UTCI 0.2℃, 0.1℃로, 시나리오 B일 때 0.1℃ 저감하는 것으로 나타나 거의 효과가 없는 것으로 분석되었다.

표 13 시나리오별 주간 평균 UTCI 및 16시 UTCI 감소량

단위: °C

시나리오		주간 (6시~19시)			16시		
		UTCI	S.D.	UTCI 감소량	UTCI	S.D.	UTCI 감소량
도로변 가로	A	34.4	5.8	-	39.4	2.5	-
	B	33.3	5.4	1.1	37.6	2.2	1.8
	C	32.7	5.0	1.7	36.7	2.0	2.7
건물변 가로	A	34.0	6.0	-	38.4	2.6	-
	B	33.9	5.9	0.1	38.2	2.6	0.2
	C	33.8	5.8	0.2	38.1	2.6	0.3
오픈스페 이스	A	34.0	6.0	-	39.5	2.4	-
	B	32.8	5.4	1.2	37.5	2.1	2.0
	C	32.1	4.8	1.9	36.2	1.9	3.3
벽면	A	34.1	5.9	-	39.2	2.5	-
	B	33.4	5.5	0.7	38.1	2.7	1.1
	C	32.8	5.2	1.3	37.1	2.8	2.1
옥상	A	34.1	5.9	-	39.2	2.5	-
	B	34.0	5.9	0.1	39.1	2.1	0.1
	C	34.0	5.9	0.1	39.0	2.5	0.2
Max		32.8	-	1.9	37.5	-	3.3
Min		32.1	-	0.1	36.2	-	0.1
모든 유형	A	34.1	5.9		39.2	2.5	
	B	32.2	5.0	1.9	36.1	2.4	3.1
	C	31.0	4.3	3.1	34.3	2.4	4.9

시나리오별 평균 UTCI (6시 ~ 19시)

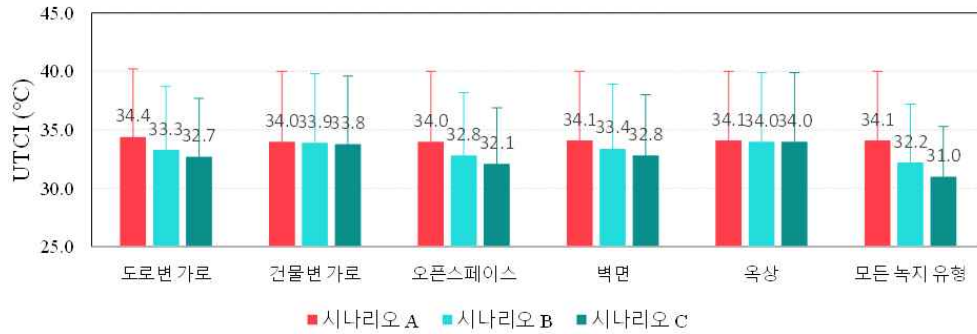


그림 18 시나리오별 주간(6시~19시) 평균 UTCI 비교

시나리오별 UTCI 저감량 (6시~19시)

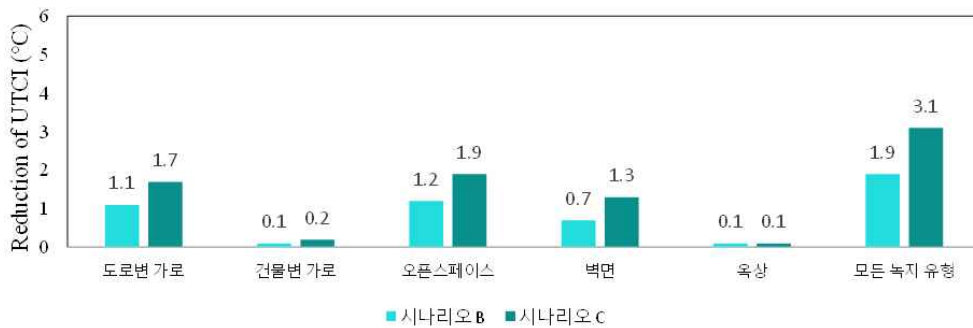


그림 19 시나리오별 주간(6시~19시) 평균 UTCI 감소량 비교

시나리오별 평균 UTCI (16시)

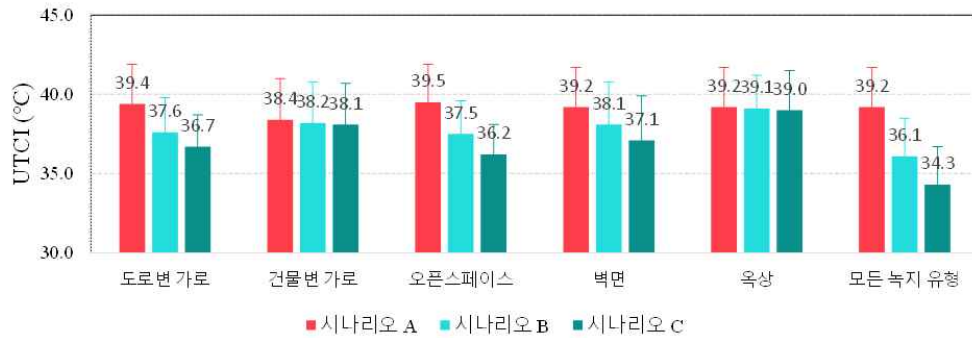


그림 20 시나리오별 16시 UTCI 비교

시나리오별 UTCI 저감량 (16시)

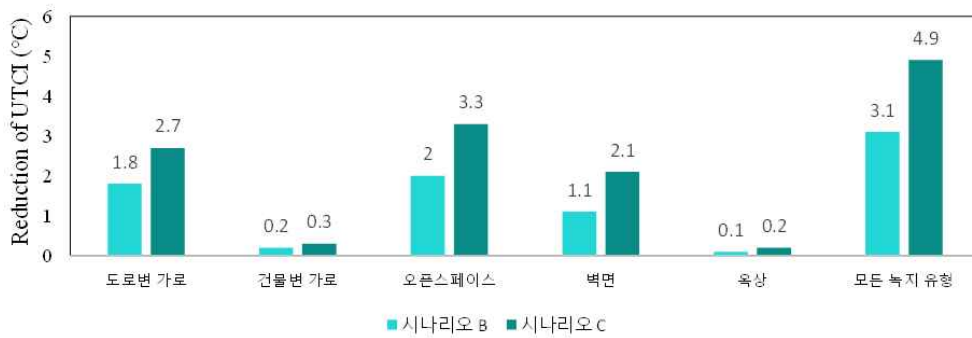


그림 21 시나리오별 16시의 UTCI 감소량 비교

제3절 시나리오별 UTCI 공간분포 평가

1. 시나리오별 UTCI 척도의 공간분포 비율

시나리오별로 주간의 UTCI 척도⁹⁾가 보행권을 차지하는 비율 변화량을 분석하였다. 본 연구 대상지에서는 UTCI 수치가 최대 Very strong heat stress 구간까지 도달하였으며, 그 이하 범위로 Strong heat stress, Moderate heat stress, No thermal stress 구간에 분포하고 있음을 확인하였다(그림 22). 각각의 시나리오를 적용함에 따라 열적 스트레스가 존재하는 구간의 감소율은 표 14, 표 15, 표 16과 같이 나타났다.

표 14에서는 열적 스트레스가 가장 높았던 Very strong heat stress 구간의 감소율을 산출하였다. 열 저감 효과가 가장 뛰어난 오픈스페이스 유형을 통해 시나리오 C일 때 Very strong heat stress 구간의 감소율이 47%, 시나리오 B일 때 감소율이 35%로 나타났다. 도로변 가로 유형을 통한 Very strong heat stress 구간의 감소율은 시나리오 C일 때 37%, 시나리오 B일 때 25%로 나타났으며, 벽면 유형을 통한 Very strong heat stress 구간의 감소율은 시나리오 C일 때 22%, 시나리오 B일 때 10%로 나타났다. 건물변 가로 유형을 도입했을 때는 시나리오 C일 때 8%, 시나리오 B일 때 3%로 Very strong heat stress 구간이 차지하는 비율의 감소가 타 유형에 비하여 크게 일어나지 않았음을 확인하였다. 옥상 유형의 경우 감소율이 시나리오 C일 때 -3%, 시나리오 B일 때 -1%로 나타나, Very strong heat stress가 차지하는 공간이 오히려 증가하였음을 확인하였다.

9) UTCI 척도 (Universal Thermal Climate Index Category): Extreme heat stress (above +46); Very strong heat stress (+38 to +46); Strong heat stress (+32 to +38); Moderate heat stress (+26 to +32); No thermal stress (+9 to +26); Slight cold stress (+9 to 0); Moderate cold stress (0 to -13); Very strong cold stress (-27 to -40); Extreme cold stress (below -40)

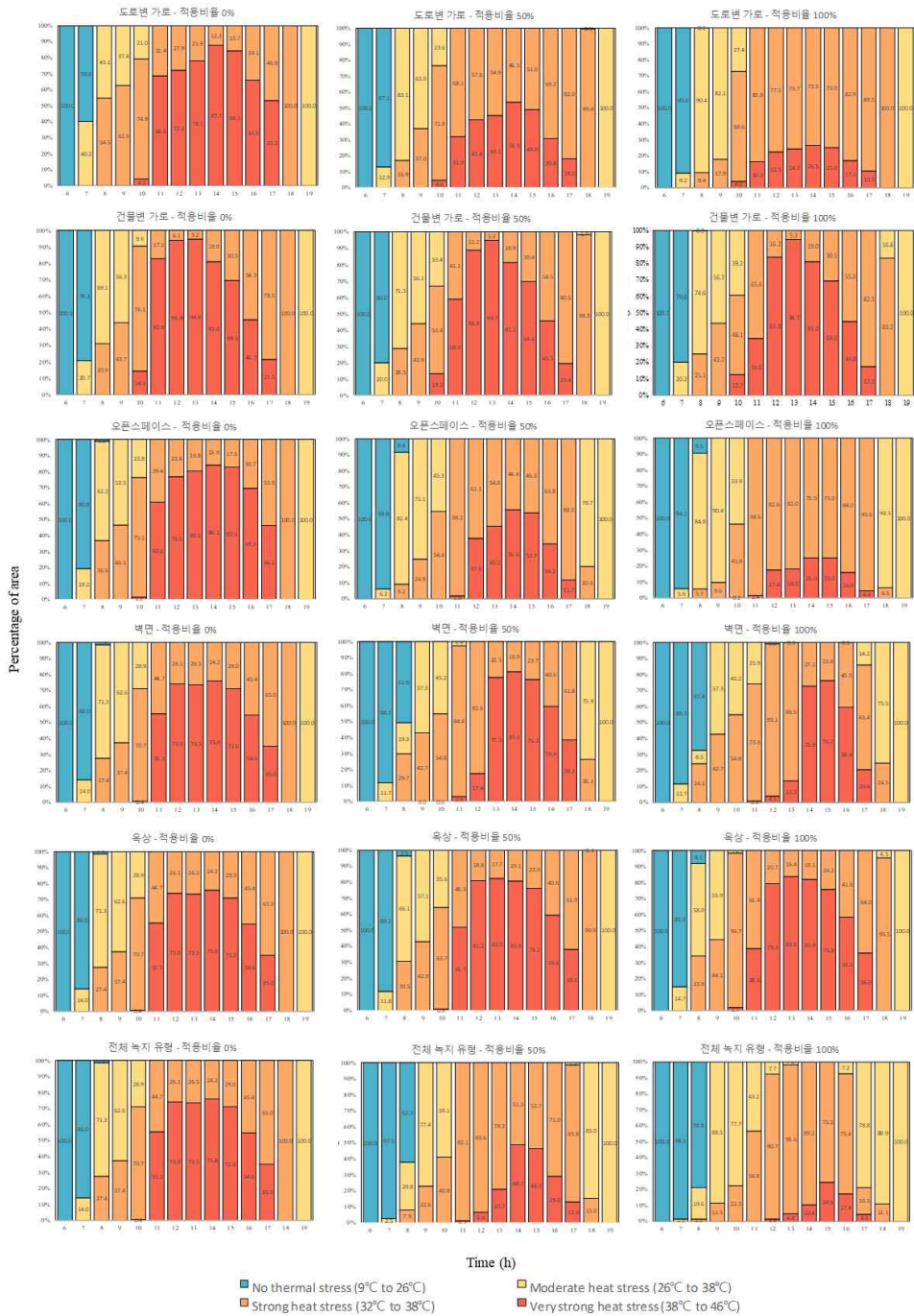


그림 22 시간별 UTCI 평가 척도의 공간 분포 비율

표 15에서는 Strong heat stress 구간의 감소율을 설명한다. 오픈스페이스 유형을 통해 시나리오 C일 때 Strong heat stress 구간의 감소율이 21%, 시나리오 B일 때 감소율이 16%로 나타났다. 도로변 가로 유형을 통한 Strong heat stress 구간의 감소율은 시나리오 C일 때 12%, 시나리오 B일 때 8%로 나타났으며, 벽면 유형을 통한 Very strong heat stress 구간의 감소율은 시나리오 C일 때 10%, 시나리오 B일 때 5%로 나타났다. 건물변 가로 유형을 도입했을 때는 시나리오 C일 때 5%, 시나리오 B일 때 3%로 나타났다. 옥상 유형의 경우 감소율이 시나리오 C일 때 -3%, 시나리오 B일 때 -1%로 나타나, Strong heat stress 구간에서도 오히려 공간적인 분포가 증가한 것을 확인하였다. 전반적으로 Strong heat stress 구간은 Very strong heat stress 구간에 비해 감소율이 적었음을 확인하였다.

표 16에서는 Moderate heat stress 구간의 감소율을 설명한다. 오픈스페이스 유형을 통해 시나리오 C일 때 Moderate heat stress 구간의 감소율이 6%, 시나리오 B일 때 감소율이 5%로 나타났다. 도로변 가로 유형을 통한 Moderate heat stress 구간의 감소율은 시나리오 C, 시나리오 B일 때 모두 5%로 나타났으며, 벽면 유형을 통한 Moderate heat stress 구간의 감소율은 시나리오 C일 때 6%, 시나리오 B일 때 5%로 나타났다. 건물변 가로 유형을 도입했을 때는 시나리오 B, 시나리오 C일 때 모두 0%로 변화가 일어나지 않았다. 옥상 유형의 경우 감소율이 시나리오 C일 때 1%, 시나리오 B일 때 0%로 나타나는 것을 확인하였다.

결과적으로, 녹지의 적용으로 가장 더운 구간인 Very strong heat stress의 공간적 분포가 가장 크게 줄었음을 확인하였으며 Moderate heat stress 구간의 공간적 분포 감소가 가장 적게 일어났음을 확인하였다.

표 14 시나리오 A 대비 시간별 Very strong heat stress 구간의 감소율

단위: %

시나리오		6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	평균
도로변 가로	B	0	0	0	0	7	53	41	42	39	42	53	66	0	0	25
	C	0	0	0	0	14	76	69	69	70	70	74	80	0	0	37
건물변 가로	B	0	0	0	0	0	29	5	0	0	0	0	10	0	0	3
	C	0	0	0	0	20	58	11	0	0	0	2	19	0	0	8
오픈스 페이스	B	0	0	0	0	100	97	50	44	34	35	51	75	0	0	35
	C	0	0	0	0	100	98	77	78	70	70	77	90	0	0	47
벽면	B	0	0	0	0	0	95	77	-5	-7	-7	-9	-9	0	0	10
	C	0	0	0	0	0	98	94	82	4	-7	-9	42	0	0	22
육상	B	0	0	0	0	0	6	-10	-12	-7	-7	-9	-9	0	0	-3
	C	0	0	0	0	0	30	-7	-14	-8	-7	-7	-3	0	0	-1
전체 유형	B	0	0	0	0	0	98	91	72	36	35	47	63	0	0	32
	C	0	0	0	0	0	100	98	93	86	65	68	87	0	0	43

표 15 시나리오 A 대비 대비 시간별 Strong heat stress 구간의 감소율

단위: %

시나리오		6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	평균
도로변 가로	B	0	0	69	41	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8
	C	0	0	83	71	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
건물변 가로	B	0	0	8	-1	26	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3
	C	0	0	19	0	33	0	0	0	0	0	0	0	17	0	5
오픈스 페이스	B	0	0	75	46	29	0	0	0	0	0	0	0	80	0	16
	C	0	0	84	79	40	0	0	0	0	0	0	0	93	0	21
벽면	B	0	0	-8	-14	23	3	0	0	0	0	0	0	74	0	5
	C	0	0	12	-14	23	26	1	0	0	0	0	14	76	0	10
육상	B	0	0	-11	-15	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
	C	0	0	-23	-18	-38	0	0	0	0	0	0	0	5	0	-5
전체 유형	B	0	0	71	40	43	17	0	0	0	0	0	1	85	0	18
	C	0	0	58	40	20	8	2	0	0	7	79	89	100	0	29

표 16 시나리오 A 대비 대비 시간별 Moderate heat stress 구간의 감소율

단위: %

시나리오		6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	평균
도로변 가로	B	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	C	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
건물변 가로	B	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
오픈스 페이스	B	0	68	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	C	0	70	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
벽면	B	0	17	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	C	0	17	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
육상	B	0	16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	C	0	-5	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
전체 유형	B	0	82	62	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	12
	C	0	89	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12

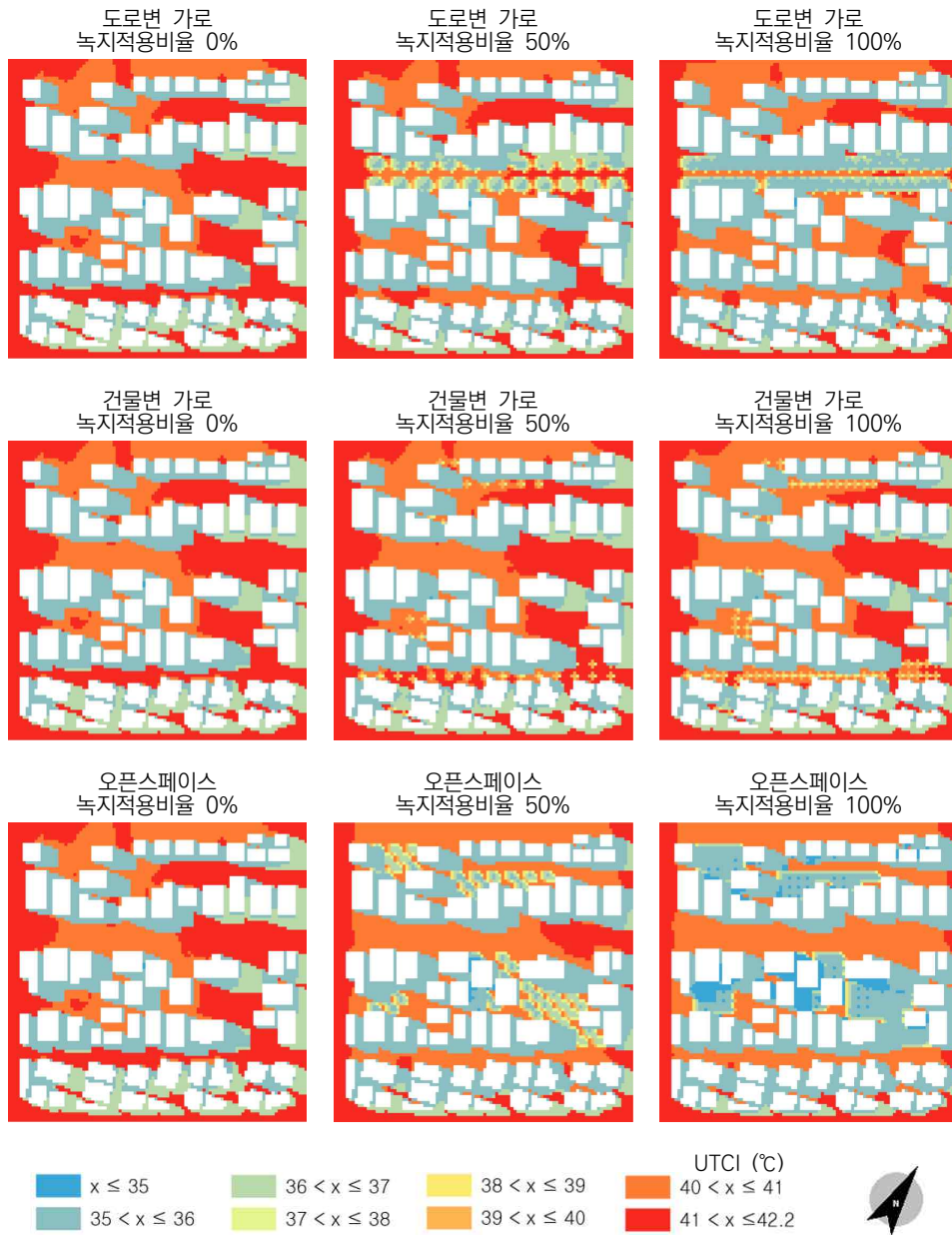
2. 시나리오별 UTCI 공간분포

시나리오별 공간분포 분석은 녹지로 인한 효과가 가장 컸던 16시에 대해 진행하였다. 그림 23은 16시 지상 1.4m 높이에서의 UTCI 공간 분포가 시나리오별로 도출된 결과이며, 그림 24에서는 시나리오별 UTCI 수치 분포를 확인할 수 있다.

시나리오 A의 경우, 건물의 그림자 부분에서 비교적 낮은 열 스트레스를 보이며, 그림자가 지지 않는 공간은 높은 열 스트레스를 받는다. 벽면 유형의 녹지를 도입한 경우 건물로 인한 그림자가 지는 구간의 UTCI가 저감됨을 확인할 수 있으며, 그림자가 지는 구역 이외의 전반적인 공간에서도 UTCI가 저감되는 것을 확인하였다. 오픈스페이스와 도로변 가로 유형의 경우, 시나리오 A일 때 건물 그림자의 영향을 받지 않은 영역이 녹화 후에는 수목으로 피복되며 수관 형상을 따라 UTCI 수치가 4℃ 가량 저감되는 것을 확인하였다. 한편, 건물변 녹화의 경우 교목이 심긴 다른 유형에 비하여 UTCI의 저감이 적게 일어난 것을 확인하였으며, 수목이 심긴 주변 지역에 미치는 영향도 적은 것으로 분석되었다. 옥상 유형의 경우 공간분포의 뚜렷한 변화가 나타나지 않았으며, 건물 높이가 낮은 일부 건물 주변에서 저감이 일어났음을 확인하였다.

그림 24의 시나리오별 UTCI 수치 분포에 의하면 건물변 가로, 오픈스페이스의 시나리오 C 유형은 UTCI 척도를 한 단계 낮출 수 있는 수준으로 UTCI 분포가 저감하며 가장 뚜렷한 변화를 보였다. 벽면녹화의 경우 최대값의 감소보다 최소값의 감소가 더 많이 일어났는데, 이는 기존 UTCI가 낮았던 건물 그림자의 영역이 그림자가 지지 않는 영역보다 더 많은 저감이 이루어졌기 때문으로 해석할 수 있다. 건물변 가로 유형의 경우 시나리오 B일 때와 시나리오 C일 때 비슷한 수준으로 UTCI가 저감한 것을 확인하였다. 옥상 유형의 경우 녹지 적용에 따른 분포의 변화가 거의 나타나지 않았다. 옥상 녹화의 경우 건물 높이와 도로 폭의 비가 1을 초과하면 열 개선 효과가 급격히 낮아지는데(Ng et al., 2012), 연구 대상지 대부분 구간에서의 비가 1을 초과하여 나타난 결과

로 해석된다. 시나리오 A의 경우 Moderate heat stress와 Strong heat stress 구간에 분포하였으며, 시나리오 B의 경우 Strong heat stress와 Very strong heat stress 구간에 분포하여, 시나리오 A에 비하여 구간 간 개선이 뚜렷이 나타났음을 확인하였다.



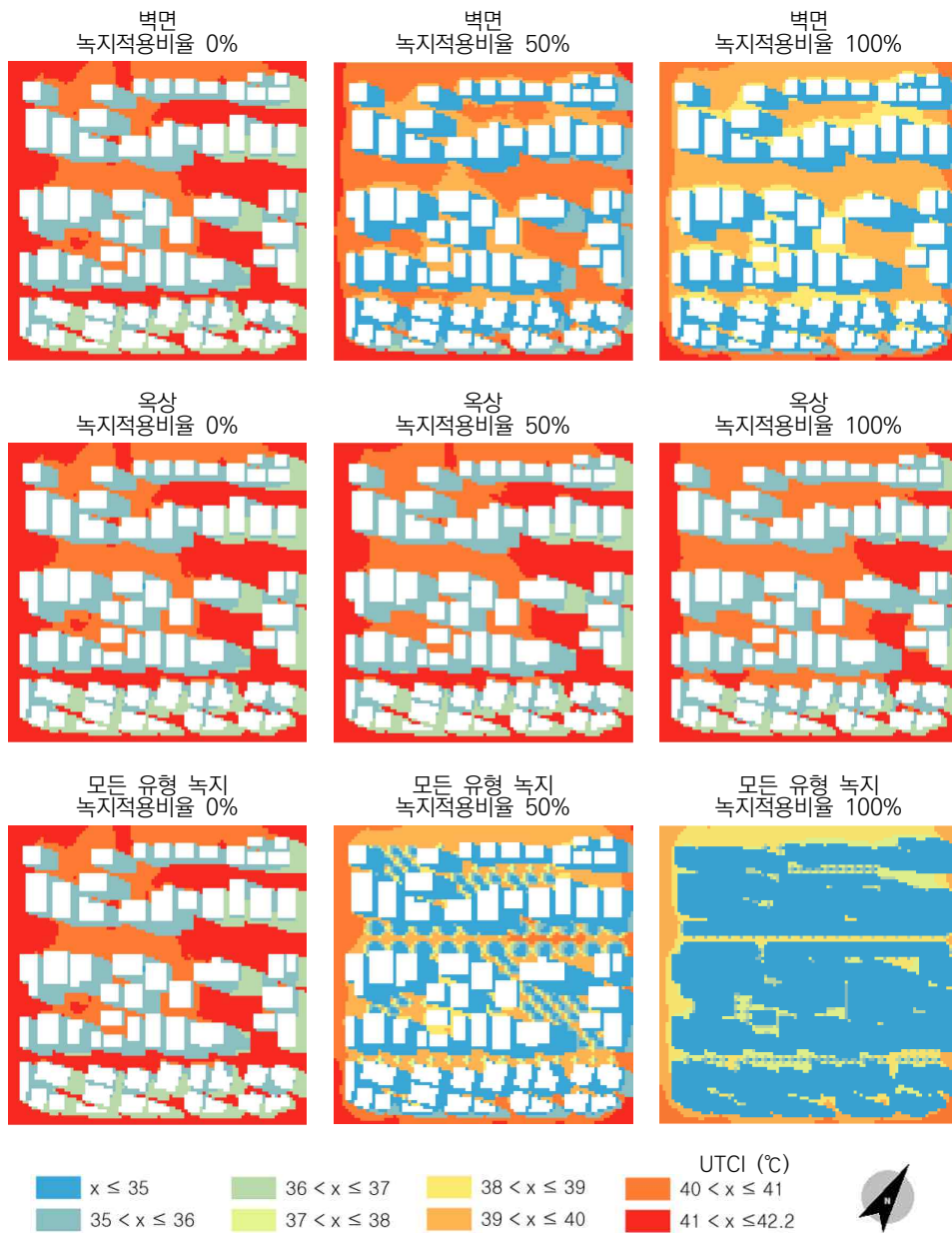


그림 23 시나리오별 UTCI의 공간 분포(16:00, 지상 1.4m)

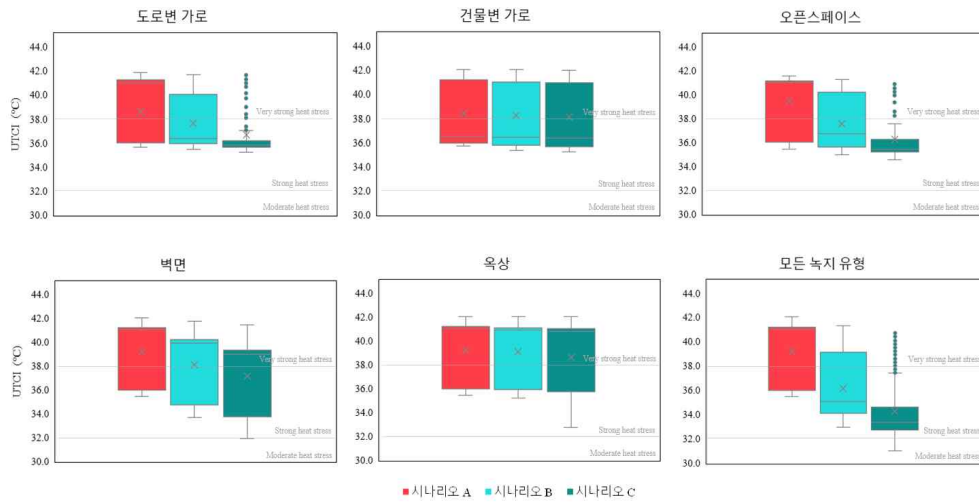


그림 24 시나리오별 UTCI 분포 비교(16:00, 지상 1.4m)

제4절 고찰

1. 녹지의 양과 UTCI와의 관계

본 연구에서는 시나리오에 녹지 적용 비율을 두어 녹지 유형별 녹지의 양에 따른 UTCI 저감량을 살펴볼 수 있었다. 교목이 식재되었던 유형은 도로변 녹지, 건물변 녹지, 오픈스페이스 유형으로, 도로변 가로 유형의 경우 수고 10m, 수관폭 7m 교목을, 건물변 가로 유형의 경우 수고 3m, 수관폭 3m 교목을, 오픈스페이스 유형의 경우 수고 7m, 수관폭 5m 교목을 적용하였다. 즉, 유형별로 구성된 녹지의 부피량, 수고, 녹지 면적에 차이가 있었으며, 적용된 수목의 주 수에도 차이가 있었다. 이들은 UTCI와 연관성이 있을 가능성이 있는 인자로, 유형별 차이가 있었던 녹지 부피, 수목 주 수, 수고, 녹지 면적, 녹지율, 종횡비 중 UTCI에 영향을 미치는 인자를 도출하고자 상관분석을 진행하였다. 교목이 적용되는 시나리오의 표본 개수는 9개로, 비모수검정에 해당하는 스페어만 순위상관분석을 진행하였다. 시나리오별 정보는 표 17과 같다.

표 17 시나리오별 UTCI 및 UTCI 관련 인자 정보

시나리오		UTCI	녹지 부피	수목 주 수	수고	녹지 면적	녹지율	종횡비
도로변 가로	A	34.4℃	0m ³	0	0m	0m ²	0.0%	0.7
	B	33.3℃	4,950m ³	22	10m	568m ²	21.4%	0.7
	C	32.7℃	9,765m ³	43	10m	1,110m ²	41.8%	0.7
건물변 가로	A	33.8℃	0m ³	0	0m	0m ²	0.0%	1.1
	B	33.9℃	330m ³	55	3m	391m ²	13.1%	1.1
	C	33.8℃	606m ³	101	3m	718m ²	24.0%	1.1
오픈스 페이스	A	34℃	0m ³	0	0m	0m ²	0.0%	0.6
	B	32.8℃	4,316m ³	52	7m	1,027m ²	17.5%	0.6
	C	32.1℃	8,632m ³	104	7m	2,054m ²	35.0%	0.6

결과적으로 UTCI에 주요 영향을 미치는 인자는 녹지 면적, 녹지율, 녹지 부피, 수고 순으로 나타났다(표 18). 이는 교목의 수관 폭, 녹지 부피, 수고를 고려한 식재 조성 및 유지관리가 필요함을 시사한다. 또한 본 연구에서 분석하고자 했던 녹화 유형 외에도 녹지 면적, 녹지율, 녹지 부피, 수고가 UTCI에 유의미하게 영향을 미친다는 점을 설명하여 녹지 유형 뿐 아니라 녹지 면적, 녹지율, 녹지 부피, 수고 또한 UTCI에 영향을 미쳤다는 점을 보여준다.

표 18 UTCI와 시나리오 인자 간 스페어만 순위상관분석

			UTCI
Spearman' s rho	UTCI	Correlation Coefficient	1
		Sig. (2-tailed)	.
		N	9
	녹지 부피	Correlation Coefficient	-.894**
		Sig. (2-tailed)	0.001
		N	9
	수목 주 수	Correlation Coefficient	-0.579
		Sig. (2-tailed)	0.103
		N	9
	수고	Correlation Coefficient	-.806**
		Sig. (2-tailed)	0.009
		N	9
	녹지 면적	Correlation Coefficient	-.902**
		Sig. (2-tailed)	0.001
		N	9
	녹지율	Correlation Coefficient	-.826**
		Sig. (2-tailed)	0.006
		N	9
	중형비	Correlation Coefficient	0.318
		Sig. (2-tailed)	0.405
		N	9

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

2. 소결 및 고찰

본 연구에서는 저층 고밀 시가화지역에 해당하는 역삼동 일대 대상지에 녹지 유형별, 녹지 적용 비중별 시나리오를 적용함에 따라 나타나는 보행권의 열 쾌적성 변동을 분석하였다. 녹지 유형은 도시지역 경관에 통합되는 모든 녹지가 다섯 가지로 분류되었으며, 녹지 적용 비중은 녹지의 유형마다 최대치로 적용되는 경우(시나리오 C), 최대치의 절반만큼 적용되는 경우(시나리오 B), 적용되지 않는 경우(시나리오 A)로 설정하였다.

결과적으로, 가장 효과적인 녹지 유형은 오픈스페이스로 최대치의 녹지가 적용된 경우 평가 범위의 주간 평균 UTCI는 1.9℃ 만큼, 절반의 양으로 적용된 경우 1.2℃ 만큼 저감되었다. 이는 기존 그림자의 영향을 받기 어려웠던 오픈스페이스가 수목의 그림자 효과를 받았기 때문에 나타난 결과로, 도시 열 저감에 수목의 그림자로 인한 비중이 크다는 선행연구를 뒷받침한다(박채연 외, 2017). 또한 군집형의 배식 구조가 냉각된 공기의 확산을 지연시키는 데 중요한 역할을 하기 때문에 나타난 결과로 해석된다(Cao et al., 2010; Spronken-Smith et al., 1999). 이는 일정 양의 수목을 식재할 때 보행권의 열 환경이 보다 쾌적하게 유지되도록 배식할 수 있는 지침이 될 수 있다. 벽면 유형의 경우 가장 고르게 대상지의 UTCI를 저감시켰다. 이는 고밀 시가화지역의 높은 건물 밀도로 인해 벽면 녹화의 적용 가능한 면적이 많아 나타난 결과로 해석된다. 한편 다른 유형에 비해 효과가 미비했던 옥상 유형은 식생이 위치하는 지점과 보행권과의 레벨 차이에 의한 것으로 분석된다. 옥상녹화의 경우, 종횡비가 1을 초과하면 열 개선 효과가 급격히 낮아지는데(Ng et al., 2012), 본 연구의 대부분의 구역에서는 종횡비가 1을 초과한 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과는 보행자 레벨에 식재된 수목은 다른 유형의 녹화에 비해 열 스트레스를 줄이는데 특히 유용하다는 선행연구 결과를 뒷받침한다(Cheung et al., 2018; Sun et al., 2017; Brown et al., 2015; Chen et al., 2009).

시간별로 각 시나리오를 분석한 결과, 본 연구 대상지에서 녹지로 인한

UTCI의 저감이 가장 크게 일어난 시간대는 16시로 분석되었다. 16시에 모든 녹지 유형을 시나리오 C로 적용한 경우 UTCI 4.9℃, 시나리오 B로 적용한 경우 UTCI 3.1℃만큼 저감되었음을 확인하였다. 이는 UTCI 척도를 한 단계 낮출 수 있는 수준이다. 연구 결과는 고밀 개발 지역에서 소규모 녹지가 대기 온도로 약 1~2℃의 저감시켜 유의미하게 냉각 작용을 한다는 이전 연구를 뒷받침한다(Park et al., 2017). 한편, 새벽 6시에는 오히려 녹지가 적용되었을 때 UTCI가 증가하여 혹서기 야간의 열 환경 분석의 필요성을 제기하였다.

제5장 결론

제1절 결론

고밀 시가화지역의 잔여 공간이 한정적이라는 점에서 높은 효율로 녹지가 조성되는 것은 중요하다. 본 연구에서는 ENVI-met과 rBiometeo 패키지를 통해 UTCI를 산출하여 고밀 시가화지역에서의 열 쾌적성 개선에 대한 녹지 유형과 녹지 유형의 적용 비중에 따른 기여도를 정량화하였다. 결과적으로 가장 효과적인 녹지 유형은 오픈스페이스로, 최대치의 녹지가 적용된 경우 평가 범위의 주간 평균 UTCI는 1.9℃ 만큼 저감되었다. 차례로 도로변 가로 유형에 의하여 UTCI 1.7℃, 벽면 유형에 의하여 UTCI 1.3℃, 건물변 가로 유형에 의하여 UTCI 0.2℃, 옥상 유형에 의하여 UTCI 0.1℃ 만큼 저감되었으며, 모든 녹화를 적용한 경우 UTCI 3.1℃ 만큼 저감되었다. 주간 중 녹지의 열 쾌적성 증진 효과가 가장 뛰어났던 시간은 16시로, 가장 효과적이었던 오픈스페이스 유형의 적용으로 평가 범위의 UTCI가 3.3℃ 만큼 저감되었으며, 모든 녹화를 적용한 경우 UTCI 4.9℃ 만큼 저감되어 UTCI 척도를 한 단계 낮출 수 있는 수준으로 열 쾌적성이 증진됨을 확인하였다. 한편, 녹지 적용으로 인하여 UTCI 척도 중 열 쾌적성이 가장 나빴던 Very strong heat stress 구간의 분포 비율이 감소율이 가장 크게 나타났다.

제2절 의의 및 한계

본 연구는 녹지 유형에 따른 열 쾌적성을 평가한 것으로, 열 환경에 큰 영향을 미치는 잎의 부피, 수고 등을 단일 설정으로 구성하였다는 한계가 있다. 실제 도시 수목은 다양한 형태로 구성되므로 추후 연구에서 이들이 반영되면 더욱 정밀한 연구 결과를 도출할 수 있을 것이다. 연구의 시간적 범위는 주간

으로, 낮 동안 녹지가 열 쾌적성에 미치는 긍정적인 결과에 대해 도출하였다. 하지만 혹서기에는 열대야 현상도 주요 문제이며, 야간에는 녹지로 인한 열 쾌적성이 저해되는 경우가 있어(Morakinyo et al., 2017) 야간에 대한 분석도 동시에 진행해 볼 필요가 있다.

본 연구 결과는 연중 가장 더운 시기인 혹서기 주간이라는 시간적 범위에서 진행된 연구로 연구 대상지에서 효율적인 녹지 유형을 제안하며, 각 유형에 대한 열 쾌적성 저감량에 대한 정량적인 수치를 제공한다. 연구의 결과는 도시계획 및 녹화계획, 지역 주민과 지자체의 녹화 의사 결정에 도움을 줄 수 있다.

참고문헌

1. 국내 문헌

1) 학회지 논문

김대욱, 정응호, & 차재규. (2013). 대구광역시 저층주거지역의 옥상녹화 조성에 따른 주변 열환경 변화 모의실험. 한국주거학회논문집, 24(3), 45-53.

박채연, 이동근, 권유진, & 허민주. (2017). 도시열섬현상완화를 위한 그린인프라 전략. [Green-infra Strategies for Mitigating Urban Heat Island]. 한국환경복원기술학회지, 20(5), 67-81.

안새결, 이동근, 김준식 & 성선용. (2017). 서울시 주거지역의 건축물 면적 비율에 따른 여름철 주간 지표면온도 영향 분석. 대한국토도시계획학회, 52(2), 171-181.

최희준, 이정아, 손희정, 조동길, & 송영근. (2017). 도시정원 도입을 위한 고밀 시가화지역 내 녹지 네트워크 구축 가능성 평가. 한국환경생태학회지, 31(2), 252-265.

2) 학위논문

박채연. (2017). Variations in the cooling effect of a small urban river depending on urban canyon geometry. 국내석사학위논문, 서울대학교 대학원, 서울.

Nadia Assaf. (2020). Green rooftops' mitigation potential on Urban Heat Island. 국내석사학위논문. 서울대학교 대학원.

Ren Yiwel. (2018). A Study on the Outdoor Thermal Comfort of Pedestrians in the Commercial Streets. 국내석사학위논문. 서울대학교 대학원.

Yingnan Li. (2018). Microclimate Variations in Urban Green Spaces Depending on Site Characteristics. 국내박사학위논문. 서울대학교 대학원.

3) 보고서

국립재난안전연구원. (2017). 『인공위성 데이터 직수신 인프라를 활용한 한반도 지표온도 분석기술 개발』.

국토연구원. (2016). 『도시지역 미기후 관리방향 연구』.

서울연구원. (2016). 『서울시 기후환경에너지 지도 제작』.

4) 웹사이트 및 기타

<http://www.kma.go.kr/> (검색일: 2020년 2월 25일)

<http://kosis.kr/> (검색일: 2020년 3월 7일)

<https://map.naver.com/v5/> (검색일: 2020년 3월 31일)

https://www.weather.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp/ (검색일: 2020년 4월 2일)

2. 국외 문헌

1) 단행본

Oke, T.R., Boundary Layer Climates, second ed., Methuen Publishers, Lagos, 1987.

2) 학회지 논문

Aboelata, A. (2020). Vegetation in different street orientations of aspect ratio (H/W 1:1) to mitigate UHI and reduce buildings' energy in arid climate. Building and Environment, 172, 106712.

Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. Urban Forestry & Urban Greening, 11(3), 245-255.

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.

Blazejczyk, K. (1994). New climatological-and-physiological model of the human heat balance outdoor (MENEX) and its applications in bioclimatological studies in different scales (Vol. 28).

Blazejczyk, K. (2004). Assessment of radiation balance in man in various meteorological and geographical conditions. *Geographia Polonica*, 77, 63-76.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515-535.

Błazejczyk K, Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Epstein Y, Psikuta A, Kampmann B (2013) An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). *Geogr Pol* 86(1):5-10.

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.

Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1986). Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model. *International Journal of Biometeorology*, 30(1), 43-52.

Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1995). *Microclimatic landscape design: Creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: Wiley.

Brown, R. D., Vanos, J., Kenny, N., & Lenzholzer, S. (2015). Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change. *Landscape and Urban Planning*, 138, 118-131.

Bruse, M. (2004). *ENVI-met 3.0: Updated Model Overview*, University of

Bochum.

Bruse, M., & Fler, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3), 373-384.

Bryse, K., Oreskes, N., O' Reilly, J., & Oppenheimer, M. (2013). Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Global Environmental Change*, 23(1), 327-337.

Buccolieri, R., Santiago, J.-L., Rivas, E., & Sanchez, B. (2018). Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31, 212-220.

Burgess, R., & Jenks, M. (2002). *Compact Cities: Sustainable Urban Forms for Developing Countries*: Taylor & Francis.

Cao, X., Onishi, A., Chen, J., & Imura, H. (2010). Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, 96(4), 224-231.

Chen, H., Ooka, R., Huang, H., & Tsuchiya, T. (2009). Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment*, 44(11), 2290-2299.

Cheung, C. S. C., & Hart, M. A. (2014). Climate change and thermal comfort in Hong Kong. *International Journal of Biometeorology*, 58(2), 137-148.

Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-76.

Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 30(4), 313.

Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45, 143–159.

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56, 429–441.

Gagge, A. P., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77(1), 247–262.

Gagge, A. P., Fobelets, A. P., & Berglund, P. E. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92, 709–731.

Gonzalez, R. R., Nishi, Y., & Gagge, A. P. (1974). Experimental evaluation of standard effective temperature a new biometeorological index of man's thermal discomfort. *International Journal of Biometeorology*, 18(1), 1–15.

Grimmond, C. S. B., (1992). The Suburban Energy-Balance-Methodological Considerations and Results for a Midlatitude West-Coast City Under Winter and Spring Conditions Rid A-2179-2009. *International Journal of Climatology* 12: 481–497.

Hamada, S., & Ohta, T. (2010). Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(1), 15–24.

Havenith, G., Fiala, D., Błażejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., et al. (2012). The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 461–470.

Hsieh, C.-M., Jan, F.-C., & Zhang, L. (2016). A simplified assessment of

how tree allocation, wind environment, and shading affect human comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 126-137.

Höppe, P. R. (1993). Heat balance modeling. *Experientia*, 49, 741-746.

Höppe, P. R. (1999). The physiological equivalent temperature – A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75.

Jendritzky, G., Schirmer, H., Menz, H., & Schmidt-Kessen, W. (1990). (Method for spatial evaluation of the thermal component in the bioclimate of man (updated Klima-Michel-Model)) Methode zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Akad. f. Raumforschung u. Landesplanung, Hannover, Beiträge*, No. 114.

Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421-428.

Kim, Dae, W., Kim, Jung, K., Jung, & Eung, H. (2010). An Analysis of Micro-climate Environmental Changes Followed by Establishment of an Urban Park- Focused on the Junggu in Daegu City. [An Analysis of Micro-climate Environmental Changes Followed by Establishment of an Urban Park- Focused on the Junggu in Daegu City]. *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 11(2), 77-94.

Lau, K. K.-L., Chung, S. C., & Ren, C. (2019). Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment*.

Lehmann, I., Mathey, J., Rößler, S., Bräuer, A., & Goldberg, V. (2014). Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services – Application to the analysis of micro-climatic effects.

Ecological Indicators, 42, 58-72.

Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., & Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.*, 5(6), 1377-1393.

Lenzholzer, S., & Brown, R. D. (2016). Post-positivist microclimatic urban design research: A review. *Landscape and Urban Planning*, 153, 111-121.

Li, Y., & Song, Y. (2019). Optimization of Vegetation Arrangement to Improve Microclimate and Thermal Comfort in an Urban Park. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 7(1), 18-30.

Lu, J., Li, Q., Zeng, L., Chen, J., Liu, G., Li, Y., . . . Huang, K. (2017). A micro-climatic study on cooling effect of an urban park in a hot and humid climate. *Sustainable Cities and Society*, 32, 513-522.

Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84.

Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A., & Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16-28.

Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1-17.

Nazarian, N., Fan, J., Sin, T., Norford, L., & Kleissl, J. (2017). Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature. *Urban Climate*, 20, 251-267.

Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong.

Building and Environment, 47, 256-271.

Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138.

Oke, T. R., (1982). The energetic basis of urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.

Oke, T. R., (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. World Meteorological Organization, (81), p.51. Available at: <http://www.geog.ubc.ca/~toke/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>.

Park, J., Kim, J.-H., Lee, D. K., Park, C. Y., & Jeong, S. G. (2017). The influence of small green space type and structure at the street level on urban heat island mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 203-212.

Park, S., Tuller, S. E., & Jo, M. (2014). Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. *Landscape and Urban Planning*, 125, 146-155.

Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495-506.

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2002). The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites, *Build. Environ.* 37:1279-1288.

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2004). Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment*, 39(9), 1087-1099.

Shimokawa, K., Katayama, T., Hayashi, T., Tanimoto, J., Ka, H., & Ikezawa, N. (1996). Prediction of thermal environment on streets with roadside treespart 5. A study on thermal characteristics of the foliage crown by measurements. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting(Environmental Engineering), Architectural Institute of Japan1996;8:131-2.

Spronken-Smith, R. A., & Oke, T. R. (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2085-2104.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.

Tan, Z., Lau, K. K.-L., & Ng, E. (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, 114, 265-274.

Wang, Y. et al., (2015). Effects of urban trees on local outdoor microclimate : synthesizing field measurements by numerical modelling. *Urban Ecosystems*, pp.1305-1331.

Yang, Y., Gatto, E., Gao, Z., Buccolieri, R., Morakinyo, T. E., & Lan, H. (2019). The “plant evaluation model” for the assessment of the impact of vegetation on outdoor microclimate in the urban environment. *Building and Environment*, 159, 106151.

3) 학위논문

Lin, B.R. (2004). Studies of Greening's Effects on Outdoor Thermal Environment, Ph.D. Thesis Tsinghua University, Beijing, China.

4) 웹사이트 및 기타

<http://www.biometeorology.org/> (검색일: 2019년 7월 20일)

<https://www.envi-met.com/> (검색일: 2020년 4월 2일)

<http://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do> (검색일: 2020년 3월 18일)

<http://www.utci.org/> (검색일: 2019년 7월 20일)

https://www.weather.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp/ (검색일: 2020년 2월 15일)

<https://rdr.io/github/alfcrisci/rBiometeo/man/utci.html> (검색일: 2020년 5월 20일)

부록

표 19 2017년 7월 29일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	25.8	70.5	4	92
1:00	25.9	70.2	4	91
2:00	25.7	73.6	4	91
3:00	25.8	72.1	3.6	91
4:00	25.7	58.1	4	90
5:00	25.7	78.4	3.6	90
6:00	25.5	60.5	4.7	90
7:00	25.7	70.3	4.7	89
8:00	26.1	59.1	5	85
9:00	26.7	49.5	6.1	80
10:00	27.7	50	5	75
11:00	27.7	122.7	5.4	76
12:00	28.1	56.4	6.8	74
13:00	29.6	44.8	2.9	69
14:00	29.6	71.3	4.3	67
15:00	29	279.6	4	71
16:00	29.9	178.1	5	64
17:00	30	156.9	5.4	63
18:00	29.9	205.7	3.6	62
19:00	29	149.7	3.2	65
20:00	28.2	148.8	5.4	69
21:00	27.4	153.5	4.3	74
22:00	26.8	129	6.1	77
23:00	26.5	268.6	3.6	77

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 20 2017년 7월 30일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	26.1	136.6	5.4	78
1:00	25.7	204.7	6.1	79
2:00	25.4	185.3	3.6	79
3:00	25.4	157.3	2.9	79
4:00	25.2	204.6	5.4	79
5:00	25.1	141.2	2.2	80
6:00	24.8	187.7	4.7	82
7:00	25.1	209.9	2.5	81
8:00	25.7	185.6	4.3	80
9:00	26.7	204	5	76
10:00	28.1	282.1	6.1	71
11:00	28.5	299.3	5	67
12:00	29.5	238	5	58
13:00	31	263.9	6.1	51
14:00	30.9	237.4	6.8	50
15:00	31.5	198.8	6.5	49
16:00	32.5	256.5	6.5	48
17:00	32	285	6.5	49
18:00	30.9	244.7	8.3	53
19:00	30.7	357.5	5.4	55
20:00	29.6	11.4	4	60
21:00	29.5	170.4	1.8	60
22:00	29.5	352.8	2.5	61
23:00	29	96.4	0.7	63

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 21 2017년 8월 12일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	26.3	62.2	7.6	68
1:00	25.8	55.7	5.4	69
2:00	25.4	48.7	4.3	70
3:00	25.1	68.4	6.5	70
4:00	24.7	49.5	5.4	71
5:00	24.4	67.2	6.5	73
6:00	24.4	69.4	4.3	72
7:00	24.5	63.3	6.5	72
8:00	25.3	69.7	5.8	70
9:00	26.5	64.4	7.2	64
10:00	27.4	56.6	8.6	60
11:00	28.4	55.2	7.9	57
12:00	29.4	67	6.1	52
13:00	31.1	82.7	3.6	49
14:00	31	53.7	4.7	50
15:00	31.3	50.9	4.7	49
16:00	30.4	76.9	5	52
17:00	31.4	25.5	3.6	48
18:00	30.9	76.1	2.2	49
19:00	30.6	0	1.4	52
20:00	29.6	72.8	1.4	58
21:00	29	64.2	4.7	61
22:00	28.4	75.3	4.7	65
23:00	28.1	70.2	4.1	67

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 22 2018년 7월 21일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	29.5	0	0	61
1:00	29.1	0	0	62
2:00	27.8	0	0	72
3:00	27.9	0	0	71
4:00	27.1	0	0	74
5:00	26.5	0	0	79
6:00	26.4	0	0	81
7:00	27.1	0	0	78
8:00	29	0	0.7	71
9:00	29.6	60.6	0.7	68
10:00	32.6	78.1	0.7	52
11:00	32	124.4	3.2	52
12:00	33.7	87.2	3.2	45
13:00	35.1	70.6	5	43
14:00	36.4	274.7	6.5	30
15:00	37.1	7.9	5	35
16:00	36.3	263.7	9.7	37
17:00	36.1	241.5	10.1	33
18:00	35	268.1	9.4	40
19:00	33.2	278.2	10.8	50
20:00	32.3	270.6	9	54
21:00	31.8	275.7	6.8	54
22:00	31.3	261.3	4.3	50
23:00	30.8	260.2	4	52

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 23 2018년 7월 27일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	29.8	312.8	3.2	78
1:00	29.4	284.5	2.9	80
2:00	29.1	0	2.2	83
3:00	28.6	262.1	6.1	85
4:00	28.1	249.9	6.5	87
5:00	28.1	0	0	88
6:00	28.4	0	0	86
7:00	28.9	0	0	85
8:00	29.7	0	0	80
9:00	31.2	0	0	71
10:00	31.4	350.7	3.6	70
11:00	32.7	280.3	5.4	64
12:00	33.7	261.8	3.6	61
13:00	34.5	273.3	5.8	58
14:00	35.2	260.6	7.9	54
15:00	35.2	272.3	10.8	54
16:00	35.5	232	10.1	54
17:00	34.5	282.8	10.4	57
18:00	33.8	285	9.7	61
19:00	33.3	44.4	5.4	64
20:00	31.6	253.7	10.1	70
21:00	30.9	277.8	10.8	74
22:00	30.7	252.1	5.4	74
23:00	30.6	240.5	6.8	74

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 24 2018년 8월 10일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	28.3	0	0	86
1:00	28.1	0	0.7	87
2:00	27.9	0	0	88
3:00	27.6	60.6	0	87
4:00	27.5	67	2.2	86
5:00	27.2	0	0.4	87
6:00	26.9	0	0	87
7:00	27.3	53.7	2.5	82
8:00	27.8	50.7	5.4	80
9:00	29.3	57.8	5.4	70
10:00	30.6	124.6	2.9	66
11:00	32.6	86.2	1.8	57
12:00	32.6	45.3	4.3	53
13:00	34.6	165.3	5.4	49
14:00	34.9	190.4	3.6	44
15:00	34.8	201.6	5.4	43
16:00	34.8	185.1	3.6	46
17:00	35.1	32.5	1.8	44
18:00	34.5	181.2	4	47
19:00	33.8	46.3	6.1	48
20:00	33.2	43.4	7.6	49
21:00	32.4	78.3	6.1	55
22:00	31.5	72.8	6.5	60
23:00	30.4	121.8	4.7	63

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 25 2019년 8월 2일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	26.9	286.5	2.5	92
1:00	26.6	199	2.5	93
2:00	26.6	276.8	4.3	95
3:00	25.8	182.8	2.5	98
4:00	25.3	259.6	2.2	100
5:00	24.7	224.7	0.7	100
6:00	25.2	208	2.2	100
7:00	26.2	209.3	1.1	99
8:00	28	174	2.9	84
9:00	30	313.7	1.8	76
10:00	30.5	234	2.9	72
11:00	30.5	234	2.2	68
12:00	32.6	346.8	4.3	57
13:00	33.5	222.2	4.7	52
14:00	34.2	10.7	4	50
15:00	34.2	359	4.3	50
16:00	33.5	6.5	2.9	53
17:00	33.1	97.9	1.8	60
18:00	33.4	279.6	7.2	57
19:00	31.9	279.7	5	63
20:00	31.1	329.1	5.8	68
21:00	30.4	284.1	5.4	73
22:00	29.5	313.7	3.6	80
23:00	29.2	300.3	4.7	83

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 26 2019년 8월 19일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	22.9	0	0.4	87
1:00	22.4	283.9	1.1	91
2:00	22.1	117.3	1.8	93
3:00	21.5	285.6	0.4	97
4:00	21.5	150.1	1.8	98
5:00	21.3	116.9	1.1	96
6:00	21.2	97.1	1.1	95
7:00	22.7	181.5	1.1	89
8:00	24	29.8	4.3	79
9:00	25.7	110.7	3.6	73
10:00	27.7	219.7	2.9	68
11:00	29.4	57	2.9	55
12:00	30.4	335.4	4.3	50
13:00	31.6	63.8	2.9	45
14:00	33.2	103.3	3.2	44
15:00	31.9	31.1	4	41
16:00	33.1	125.2	2.9	39
17:00	32.6	70	3.2	38
18:00	30.8	0	2.5	46
19:00	29.3	183.2	2.2	52
20:00	26.3	202.1	0.7	67
21:00	25.6	0	0.4	71
22:00	25	272.3	1.1	76
23:00	24.5	0	0.4	83

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 27 2019년 8월 20일 관측소 강남의 시간별 기온, 풍향, 풍속, 습도

시간	기온(℃)	풍향(°)	풍속(km/h)	습도(%)
0:00	24.8	8.7	1.8	78
1:00	24.9	9.5	3.6	77
2:00	23.9	160.8	1.4	86
3:00	23.5	2.6	0.4	87
4:00	23.1	26.6	1.4	91
5:00	22.9	321.5	0.7	88
6:00	22.7	0	0.4	89
7:00	23.8	106.1	1.1	86
8:00	26.4	118.9	3.6	71
9:00	28	89.3	3.6	64
10:00	29.5	59	4.3	60
11:00	31.5	356.5	2.2	51
12:00	32.5	0	5	51
13:00	33	178.1	4.7	48
14:00	33.2	197.9	6.8	48
15:00	32.9	148	8.3	47
16:00	33.8	179.6	7.9	47
17:00	32.5	172.1	5.8	47
18:00	31.6	186.9	5	50
19:00	30	188	5.4	56
20:00	28.8	167.5	1.4	60
21:00	27.8	94.4	2.2	66
22:00	26.8	91.6	1.1	72
23:00	26.1	0	0	77

자료: 지역별상세관측자료(AWS)(검색일: 2020년 5월 15일)

표 28 시나리오별 기온 데이터

단위: ℃

시나리오			6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시
도로변 가로	A	Mean	26.7	26.7	27.8	29.4	30.8	31.7	32.5	33.2	33.8	34.1	34.0	33.6	33.0	32.2
		S.D.	1.0	1.0	1.2	1.5	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.5
	B	Mean	26.7	26.7	27.8	29.4	30.8	31.6	32.4	33.2	33.7	33.9	33.9	33.6	33.0	32.2
		S.D.	1.0	1.0	1.2	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.5
	C	Mean	26.7	26.7	27.8	29.4	30.7	31.6	32.4	33.2	33.7	34.0	33.8	33.5	32.9	32.1
		S.D.	1.1	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6
건물변 가로	A	Mean	26.8	26.8	28.0	29.7	31.0	32.0	32.8	33.6	34.1	34.3	34.2	33.9	33.3	32.5
		S.D.	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4
	B	Mean	26.8	26.8	28.0	29.7	31.0	32.0	32.8	33.6	34.1	34.3	34.2	33.9	33.3	32.5
		S.D.	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4
	C	Mean	26.8	26.8	28.0	29.7	31.0	31.9	32.8	33.6	34.1	34.3	34.2	33.9	33.3	32.4
		S.D.	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4
오픈 스페이스	A	Mean	26.8	26.8	27.9	29.5	30.8	31.7	32.5	33.3	33.8	34.1	34.1	33.8	33.2	32.4
		S.D.	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7
	B	Mean	26.4	26.5	27.6	29.2	30.5	31.3	32.2	33.0	33.6	33.9	33.8	33.4	32.8	32.0
		S.D.	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7
	C	Mean	26.4	26.4	27.6	29.2	30.5	31.4	32.2	33.0	33.6	33.9	33.7	33.3	32.9	31.9
		S.D.	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7
벽면	A	Mean	26.8	26.7	27.9	29.6	30.9	31.7	32.6	33.3	33.9	34.1	34.1	33.8	33.2	32.4
		S.D.	0.6	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9
	B	Mean	26.8	26.7	27.6	29.1	30.3	31.2	32.1	32.8	33.4	33.6	33.6	33.3	32.7	32.0
		S.D.	0.6	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9
	C	Mean	26.8	26.7	27.4	28.6	29.8	30.7	31.6	32.4	32.9	33.2	33.1	32.8	32.2	31.7
		S.D.	0.6	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
옥상	A	Mean	26.8	26.7	27.9	29.6	30.9	31.7	32.6	33.3	33.9	34.1	34.1	33.8	33.2	32.4
		S.D.	0.6	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9
	B	Mean	26.7	26.7	27.8	29.5	30.8	31.6	32.5	33.2	33.8	34.0	34.0	33.7	33.1	32.3
		S.D.	0.7	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
	C	Mean	26.7	26.7	27.8	29.3	30.6	31.5	32.4	33.1	33.7	33.9	33.9	33.6	33.0	32.3
		S.D.	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0

표 29 시나리오별 평균복사온도 데이터

단위: °C

시나리오			6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시
도로변 가로	A	Mean	19.4	27.7	41.7	50.9	56.3	59.3	60.6	62.8	66.1	66.6	62.0	55.0	41.3	29.0
		S.D.	0.5	7.2	11.3	11.1	9.7	7.8	6.3	5.7	5.3	7.0	9.9	10.6	7.2	0.2
	B	Mean	21.0	25.2	35.8	44.8	50.8	54.4	56.7	58.3	60.3	59.7	54.6	48.5	39.4	29.7
		S.D.	0.9	4.6	8.7	9.7	9.1	7.4	6.5	5.9	6.8	8.2	8.5	8.1	5.7	0.5
	C	Mean	21.8	25.1	33.4	41.3	47.1	51.4	54.0	55.5	56.6	55.2	51.2	45.8	38.8	30.0
		S.D.	1.1	4.0	6.8	7.7	7.3	6.3	5.5	4.9	5.9	7.2	7.5	6.6	5.3	0.6
건물변 가로	A	Mean	19.5	24.9	36.4	46.6	54.5	61.6	63.6	65.0	65.1	63.9	57.9	48.3	39.6	29.1
		S.D.	0.3	6.1	10.6	11.4	10.1	6.3	3.4	3.1	6.1	8.6	10.4	8.6	5.7	0.3
	B	Mean	19.9	25.1	36.0	45.8	53.5	60.6	62.9	64.4	64.5	63.3	57.1	47.5	39.0	29.2
		S.D.	0.6	5.9	10.4	11.4	10.2	6.5	3.5	3.2	6.1	8.6	10.3	8.6	5.6	0.4
	C	Mean	20.3	25.2	35.6	45.2	52.7	59.8	62.4	64.0	64.1	62.9	56.5	46.8	38.4	29.2
		S.D.	0.7	5.7	10.2	11.3	10.1	6.7	3.7	3.2	6.1	8.5	10.2	8.4	5.3	0.4
오픈 스페이스	A	Mean	19.3	24.6	37.6	47.2	54.1	59.1	61.1	63.0	65.4	66.2	62.7	53.6	40.9	29.1
		S.D.	0.5	5.8	11.0	11.5	10.2	7.9	6.0	5.5	5.9	7.2	9.7	10.6	6.9	0.2
	B	Mean	21.2	24.1	33.0	41.3	48.0	53.4	56.6	58.2	60.6	60.5	55.5	46.6	37.3	29.5
		S.D.	1.5	3.4	7.0	8.3	8.2	7.5	6.0	5.6	6.5	7.5	8.5	7.3	3.5	0.7
	C	Mean	22.2	24.7	31.5	38.3	44.5	49.7	53.3	54.8	56.3	55.6	50.7	43.3	36.4	29.8
		S.D.	1.8	3.2	5.4	5.9	5.9	5.9	5.1	4.7	5.7	6.8	7.3	5.1	2.4	0.9
벽면	A	Mean	19.4	25.3	38.2	47.9	54.7	59.8	61.7	63.5	65.5	65.7	61.3	52.5	40.7	29.1
		S.D.	0.5	6.4	11.1	11.5	10.1	7.6	5.7	5.1	5.8	7.6	10.1	10.4	6.7	0.2
	B	Mean	20.7	26.2	37.8	46.5	52.6	57.2	59.1	60.5	62.6	63.1	58.5	49.9	38.6	28.6
		S.D.	0.3	6.3	11.2	11.8	10.5	8.0	6.0	5.6	6.3	8.1	10.6	10.8	6.9	0.2
	C	Mean	22.0	27.3	38.0	45.6	50.9	55.0	56.8	58.0	60.2	60.8	55.9	47.3	36.5	28.4
		S.D.	0.4	6.3	11.4	12.0	10.8	8.4	6.4	6.0	6.7	8.5	11.1	11.1	6.8	0.2
옥상	A	Mean	19.4	25.3	38.2	47.9	54.7	59.8	61.7	63.5	65.5	65.7	61.3	52.5	40.7	29.1
		S.D.	0.5	6.4	11.1	11.5	10.1	7.6	5.7	5.1	5.8	7.6	10.1	10.4	6.7	0.2
	B	Mean	19.4	25.4	38.2	47.9	54.7	59.7	61.6	63.4	65.5	65.7	61.3	52.5	40.6	29.0
		S.D.	0.5	6.4	11.2	11.5	10.1	7.6	5.6	5.1	5.9	7.7	10.1	10.4	6.7	0.2
	C	Mean	19.4	25.3	38.2	47.8	54.6	59.7	61.6	63.4	65.4	65.7	61.2	52.5	40.6	29.0
		S.D.	0.5	6.4	11.2	11.5	10.1	7.6	5.7	5.1	5.9	7.7	10.1	10.4	6.7	0.2

표 30 시나리오별 풍속 데이터

단위: m/s

시나리오			6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시
도로변 가로	A	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	B	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	C	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
건물변 가로	A	Mean	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	B	Mean	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	C	Mean	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
오픈 스페이스	A	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	B	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	C	Mean	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
벽면	A	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	B	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	C	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
육상	A	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	B	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	C	Mean	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
		S.D.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

표 31 시나리오별 습도 데이터

단위: %

시나리오			6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시
도로변 가로	A	Mean	16.7	16.8	16.7	16.6	16.6	16.4	16.2	16.1	15.9	15.8	15.9	15.8	15.8	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
	B	Mean	16.7	16.8	16.8	16.8	16.8	16.6	16.4	16.3	16.0	15.9	16.0	16.0	15.9	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1
	C	Mean	16.7	16.8	16.8	16.9	17.0	16.8	16.6	16.4	16.2	16.1	16.2	16.1	16.0	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
건물변 가로	A	Mean	16.8	16.8	16.7	16.6	16.6	16.4	16.2	16.1	15.8	15.8	15.9	15.7	15.7	15.8
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
	B	Mean	16.8	16.8	16.7	16.7	16.7	16.4	16.2	16.1	15.8	15.8	15.9	15.8	15.7	15.8
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
	C	Mean	16.8	16.8	16.7	16.7	16.7	16.5	16.2	16.1	15.8	15.8	15.9	15.8	15.8	15.8
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
오픈 스페이스	A	Mean	16.7	16.8	16.7	16.6	16.6	16.4	16.2	16.1	15.9	15.8	15.9	15.8	15.8	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	B	Mean	16.9	16.9	17.0	17.1	17.1	16.9	16.7	16.5	16.2	16.1	16.1	16.0	15.9	15.9
		S.D.	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	C	Mean	16.9	16.9	17.1	17.2	17.3	17.1	16.9	16.7	16.4	16.2	16.3	16.2	16.1	15.9
		S.D.	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
벽면	A	Mean	16.7	16.8	16.7	16.6	16.6	16.4	16.2	16.1	15.9	15.8	15.9	15.8	15.8	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	B	Mean	16.7	16.7	16.7	16.6	16.6	16.4	16.3	16.1	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	C	Mean	16.7	16.7	16.7	16.6	16.6	16.4	16.3	16.2	16.0	15.9	16.0	15.9	15.9	15.9
		S.D.	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
옥상	A	Mean	16.7	16.8	16.7	16.6	16.6	16.4	16.2	16.1	15.9	15.8	15.9	15.8	15.8	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	B	Mean	16.7	16.8	16.7	16.6	16.7	16.4	16.2	16.1	15.9	15.8	15.9	15.8	15.8	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	C	Mean	16.7	16.8	16.7	16.7	16.7	16.5	16.3	16.2	16.0	15.9	15.9	15.8	15.8	15.9
		S.D.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Abstract

Simulated Thermal Comfort during the Hottest Season in Low-rise Dense Urbanized Area by Applying Urban Greening Units

Kim, Jonghee

Department of Landscape Architecture
Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

As the urban area expands due to the increase in urban population, the importance of improving the urban thermal environment continues to be raised. Urban heat islands, a phenomenon in which the temperature is higher than the surrounding areas, is reported to be the most pronounced in low-rise, high-density dense urbanized areas. The heat generation is caused by the sun and artificial materials because the artificial covering and the high building coverage ratio of cities further promote the accumulation of heat. Urban greening can be a countermeasure against urban heat reduction by blocking short-wave radiation and generating latent heat, and by strategically creating urban greening, urban heat environment

can be improved.

The purpose of this study is to obtain a quantitative change in UTCI when a greening type is introduced into a low-rise dense urbanized area vulnerable to a thermal environment. To this end, the study aims to achieve the desired purposes. First, we classify the types of greening that can be introduced into low-rise dense urbanized areas, and analyze the thermal comfort of the target area according to the application of greening type. Second, we analyze the change in the thermal comfort during daytime due to the introduction of greening, and the temporal improvement value exposed to strong heat. Third, we analyze the spatial distribution of thermal comfort according to the introduction of greening and examine the amount of change in the section occupied by strong heat.

The spatial scope of the study targets the low-rise dense urbanized area in Yeoksam-dong, Gangnam-gu, Seoul. The types of green space applied to the target land are all green areas that are integrated into the urban landscape, and are classified into five types: road side street, building side street, open space, wall, and roof. At this time, the ratio of greenery applied was assumed to be passive greening (Scenario A), realistic greening (Scenario B), and active greening (Scenario C). In this study, microclimate was simulated through the ENVI-met, and UTCI was calculated through the rBiometeo package.

As a result, the most effective green space type was open space, and when the maximum green space was applied, the average UTCI was reduced by 1.9°C. In turn, the road side street was reduced by 1.7°C UTCI, the wall surface was 1.3°C UTCI, the building side street was reduced by 0.2°C UTCI, and the roof was decreased by 0.1°C UTCI. During the daytime, the best time to improve the thermal comfort of green space was 16:00, and the UTCI of the evaluation range was reduced by 3.3°C by applying the most effective open space type. It was reduced by 4.9°C UTCI when all the recordings were applied. It was confirmed that the thermal comfort was improved to a level that could lower the UTCI scale by one step. And the distribution ratio of the very strong heat stress section, which had the worst thermal comfort among the results, was the largest.

The results of this study were conducted in the temporal range of the hottest season. Efficient green space types are proposed at the study site, and quantitative values for the thermal comfort reduction for each type are provided. The results of the study can help in urban planning and greening planning, and decision making by local residents and local governments.

keywords : URBAN HEAT ISLAND (UHI), THERMAL COMFORT, MICROCLIMATE, UNIVERSAL THERMAL CLIMATE INDEX (UTCI), LOCAL CLIMATE ZONE (LCZ), ENVI-met

Student Number : 2017-21227